

**Werkstoff-, Geometrie- und
Reihenfolgeeinflüsse auf die Lebensdauer
unter Betriebslasten**

Dissertation

Matthias Müller

2003

**Werkstoff-, Geometrie- und Reihenfolgeeinflüsse
auf die Lebensdauer unter Betriebslasten**

Von der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. Matthias Müller
geb. am 11. Januar 1969 in Dresden

Tag der Verteidigung: 14. März 2003

Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. habil. K. L. Kotte, Dresden
Herr Prof. Dr.-Ing. C. M. Sonsino, Darmstadt
Herr Dr.-Ing. H. Oppermann, München

Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Hardke
Vorsitzender der Prüfungskommission

Vorwort

Die Grundlagen für die vorliegende Dissertationsschrift entstanden während meiner fünfjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Experimentelle Mechanik / Betriebsfestigkeit des Instituts für Festkörpermechanik der Technischen Universität Dresden. Die Arbeit selbst konnte jedoch erst eineinhalb Jahre nach Beendigung meiner Tätigkeit fertiggestellt werden.

Sie enthält Ergebnisse eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG geförderten und im Jahr 2000 abgeschlossenen gemeinschaftlichen Forschungsvorhabens des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit LBF Darmstadt und der Technischen Universität Dresden.

Ich danke meinem wissenschaftlichen Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K. L. Kotte, für seine vielen hilfreichen Ratschläge, die für mich eine große Unterstützung bei der inhaltlichen Bewältigung und Abfassung der Arbeit waren.

Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. C. M. Sonsino und Herrn Dr.-Ing. H. Oppermann für ihre Mühen, die mit der Übernahme der Gutachten verbunden waren.

Meinen ehemaligen Kollegen am Institut für Festkörpermechanik danke ich für ihre Unterstützung und die in einem sehr angenehmen Arbeitsumfeld herrschende kollegiale Atmosphäre.

Meiner Freundin, meinen Eltern, Freunden und ehemaligen Kollegen danke ich für den sehr unterstützenden Ansporn zur Fertigstellung dieser Arbeit.

Ein herzliches Dankeschön gilt meinen Eltern, die mir meine berufliche Laufbahn ermöglicht haben und mich für das Erreichen der gesteckten Ziele zu jeder Zeit unterstützten.

Landau a.d. Isar, März 2003

Inhaltsverzeichnis

	Vorbemerkungen	V
	Abkürzungen und Formelzeichen	VI
0	Einleitung	1
1	Zielstellung.....	4
2	Bauteil- und Reihenfolgeeinfluß - Untersuchungen in der Vergangenheit.....	6
3	Möglichkeiten der Lebensdauerabschätzung	9
3.1	Experimentelles Vorgehen	9
3.1.1	Werkstoff- und Bauteilbelastbarkeit.....	9
3.1.2	Quasistatisches und zyklisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten.....	10
3.1.3	Der Betriebsfestigkeitsversuch	11
3.1.4	Die Belastungs-Zeit-Funktion	12
3.2	Rechnerische Lebensdauervorhersagemodelle.....	14
3.2.1	Das Nennspannungskonzept.....	15
3.2.2	Das Örtliche Konzept	16
3.2.3	Die Lebensdauerprognose	17
4	Experimentelle Basis	18
4.1	Werkstoffe und Probenformen	18
4.2	Anrißerkennung	20
4.3	Versuchsprogramm.....	23
4.4	Lastfolgen	24
4.5	Versuchsergebnisse	28
4.5.1	Quasistatisches und zyklisches Werkstoffverhalten, Dehnungswöhlerlinien ..	28
4.5.2	Zeitabhängiges Werkstoffverhalten.....	29
4.5.3	Bauteilwöhlerlinien und Lebensdauerlinien.....	37
5	Theoretische Abschätzung der Lebensdauer.....	40
5.1	Die Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung	40
5.2	Die multiple Regressionsanalyse.....	41
5.3	Datenbasis zur Nachrechnung experimenteller Lebensdauerwerte.....	43
5.4	Die Anwendung des Nennspannungskonzeptes	44

5.4.1	Mittelspannungsbewertung und Schadensakkumulation	45
5.4.2	Ein Vorschlag zur Verbesserung der Treffsicherheit mit dem Nennspannungskonzept.....	47
5.5	Die Lebensdauerabschätzung auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen	55
5.5.1	Örtliches Konzept	55
5.5.2	Lebensdauerprognose.....	63
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	67
	Literaturverzeichnis	71
	Abbildungsverzeichnis	77
	Tabellenverzeichnis	83

Vorbemerkungen

In der vorliegenden Dissertation wurden mehrfach Text, Tabellen und Abbildungen aus dem Abschlußbericht des im Vorwort erwähnten DFG-Forschungsvorhabens „Verbesserung der Treffsicherheit der Lebensdauervorhersagen durch Untersuchung und Berücksichtigung der zeitabhängigen Werkstoffreaktionen“ übernommen. Auf die Angabe der experimentellen Daten wurde in dieser Arbeit verzichtet. Sie können vollständig dem Abschlußbericht [KOTT00] entnommen werden. Dissertation und Abschlußbericht sind vom selben Autor verfaßt worden. Deshalb wird im Text bei den entsprechenden Passagen auf die Zitatangabe verzichtet.

Tabellen und Abbildungen sind als Dateien „tab_anlagen.pdf“ und „abb_anlagen.pdf“ auf CD-ROM dem Textband beigelegt.

Ausschließlich im Text enthaltene Tabellen und Abbildungen werden mit „Tabelle“ und „Abbildung“ bezeichnet. Verweise auf Tabellen und Abbildungen des Anlagenteils erfolgen mit „Tab.“ und „Abb.“ Um dem Leser das Verständnis zu erleichtern, sind in den Text Tabellen und Abbildungen aus dem Anlagenteil kopiert worden. Sie besitzen dieselbe Nummer und Bezeichnung wie in der Anlage. Gleichungen werden durchgängig mit arabischen Ziffern numeriert.

Abkürzungen und Formelzeichen

CV	..	CARLOS-Variante
DL	..	Durchläufer
einf.	..	einfach
erw.	..	erweitert
Hor.	..	Horizont
IST	..	Incremental-Step-Test
LF	..	Lastfolge
LP	..	Lebensdauerprognose
MM	..	modifizierte MINER-Regel (nach HAIBACH)
MV	..	Mittelspannungsverhältnis
NK	..	Nennspannungskonzept
ÖK	..	Örtliches Konzept
OM	..	originale MINER-Regel
SP	..	Schwingspiel
ÜB	..	Übergangsbereich
UML	..	Uniform Material Law
WL	..	Wöhlerlinie

A_5	[%]	Bruchdehnung
b		Schwingfestigkeitsexponent
c		zyklischer Duktilitätsexponent
χ^*		bezogenes Spannungsgefälle
C_r		Crestfaktor
$C_{r,m}$		Crestfaktor der Mittelwertverteilung
$C_{r,a}$		Crestfaktor der Amplitudenverteilung
D		Schädigungssumme
D_M		angepaßte Minersumme
D_{Regr}		Schädigungssumme, aus multipler Regression bestimmt
e	[‰]	Nenndehnung
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
ε_a	[‰]	Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,e}$	[‰]	elastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,p}$	[‰]	plastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,t}$	[‰]	Totaldehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,t \max}$	[‰]	maximale Totaldehnungsamplitude
ε'_f		zyklischer Duktilitätskoeffizient
ε_{\max}	[‰]	maximale Dehnung
ε_m	[‰]	Mitteldehnung
f	[Hz]	Frequenz
H	[SP]	Lastfolgeumfang

$H_{1,m}$		Häufigkeit der Mittellasten
$H_{1,z}$		Häufigkeit der Zusatzlasten
H_V		Häufigkeitsverhältnis
I_V		Intensitätsverhältnis
k, \bar{k}		Exponent für Wöhler- bzw. Lebensdauerlinienbeschreibung
k		Konstante im P_{SWTerw} -Schädigungsparameter
K'	[MPa]	zyklischer Verfestigungskoeffizient
K_t		Formzahl
\bar{L}_u		Unterlast
\bar{L}_o		Oberlast
M		geschätzte Mittelspannungsempfindlichkeit
n'		zyklischer Verfestigungsexponent
N		Schwingspielzahl
N_A		Schwingspielzahl bis Anriß
N_B		Schwingspielzahl bis Bruch
\bar{N}_{bez}		Bezugsschwingspielzahl
N_D		Schwingspielzahl am Abknickpunkt der Wöhlerlinie
\bar{N}_R		rechnerische Lebensdauer
\bar{N}_V		experimentell ermittelte Lebensdauer
P_i	[%]	Positionswahrscheinlichkeit
P_{SWT}		Schädigungsparameter nach Smith, Watson, Topper
P_{SWTerw}		Schädigungsparameter nach Smith, Watson, Topper; erweitert
$P_{\bar{U}}$	[%]	Überlebenswahrscheinlichkeit
R, \bar{R}		Lastverhältnis im Einstufen- und Randomversuch
R		multipler Korrelationskoeffizient
R^2		Bestimmtheitsmaß
R^2_{korr}		korrigiertes Bestimmtheitsmaß
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[MPa]	statische 0,2%-Dehngrenze
$R'_{p0,2}$	[MPa]	zyklische 0,2%-Dehngrenze
S	[MPa]	Nennspannung
S_a	[MPa]	Nennspannungsamplitude
$S_{a,D}$	[MPa]	Dauerfestigkeitsamplitude
$S_{a,max,m}$	[MPa]	maximale Nennspannungsamplitude der Mittellasten
$S_{a,max,z}$	[MPa]	maximale Nennspannungsamplitude der Zusatzlasten
\bar{S}_{bez}	[MPa]	Bezugsspannung
S_D	[MPa]	Dauerfestigkeit
S_m	[MPa]	Nennmittelspannung
σ_a	[MPa]	Spannungsamplitude
σ'_f	[MPa]	Schwingfestigkeitskoeffizient
σ_m	[MPa]	Mittelspannung
σ_o	[MPa]	Oberspannung
σ_u	[MPa]	Unterspannung

T_D	Streuspanne der Schädigungssummen
V	Völligkeit einer Häufigkeitsverteilung
V_a	Völligkeit der Häufigkeitsverteilung der Amplituden
V_m	mittlere Völligkeit
V_{\min}	Völligkeit der Häufigkeitsverteilung der Minima
V_{\max}	Völligkeit der Häufigkeitsverteilung der Maxima
X_{\max}	Kollektivhöchstwert
X_{RMS}	Effektivwert einer Last-Zeit-Funktion (Lastfolge)

Im Text verwendete überstrichene Zeichen beziehen sich auf Lebensdauerbetrachtungen.

0 Einleitung

Ein Bauteil so zu gestalten, daß es unter den im Betrieb auftretenden Belastungen während der vorgesehenen Einsatzdauer nicht versagt und zugleich den Forderungen nach Wirtschaftlichkeit und Leichtbau gerecht wird, ist Ziel der betriebsfesten Bemessung. Der Nachweis dieser „Betriebsfestigkeit“ kann durch Bestimmung der Lebensdauer im Experiment oder durch die Abschätzung der Lebensdauer mit Hilfe eines Rechenverfahrens geführt werden. Abhängig von der Komplexität des Bauteiles, den Anforderungen an die Sicherheit und dem Zeit- und Kostenaufwand werden beide Möglichkeiten auch in Kombination und gegenseitiger Ergänzung verwendet. Einer experimentellen Prüfung werden vordergründig Sonderkonstruktionen, Produkte aus laufender Serienfertigung (Kraftfahrzeugbauteile) und Bauteile mit sehr hohen Sicherheitsanforderungen (Flugzeugkomponenten) unterzogen. Dagegen liegt der Schwerpunkt der rechnerischen Lebensdauerabschätzung in der Phase der Produktentstehung, insbesondere wenn die Betriebsfestigkeit virtueller Bauteile zu beurteilen ist. Hier wird durch den Einsatz zuverlässiger und einfach zu handhabender rechnerischer Konzepte eine Verringerung von Entwicklungszeiten und -kosten möglich.

Grundlage für die Weiterentwicklung theoretischer Lebensdauervorhersagemodelle bilden experimentelle Untersuchungen an Werkstoff- und gekerbten Proben. Deren Beanspruchung durch eine äußere Belastung im Versuch liefert Aussagen über das Werkstoff- und Bauteilverhalten. Diese Erkenntnisse können bereits ein abschließendes Ergebnis darstellen oder dienen als Eingangsinformation für weitergehende theoretische Untersuchungen mit dem Ziel einer zuverlässigeren Lebensdauervorhersage. Darin besteht neben der „bloßen“ Bestimmung der Lebensdauer eine weitere Bedeutung des Experimentes. Konzeption, Durchführung und Auswertung von Versuchen leiten sich aus den gesuchten Informationen über einen Werkstoff oder ein Bauteil ab. Aus Versuchen an Werkstoffproben (ungekerbt) werden Aussagen über das Werkstoffverhalten unter quasistatischer und dynamischer Belastung gewonnen. Die drei wichtigsten Ergebnisse sind die statische Spannungs-Dehnungs-Kurve, die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve und die Dehnungswöhlerlinie. An gekerbten Proben lassen sich für den Werkstoff, nunmehr mit bestimmter äußerer geometrischer Gestalt, die Einflüsse von Belastung, Geometrie, Fertigung und Umgebungsbedingungen in Form von Bauteilwöhlerlinien und Lebensdauerlinien zeigen.

Die Reaktionen des Werkstoffes auf die Belastungsart - Biegung, Zug-Druck, Torsion in reiner oder überlagerter Form - und die Belastungscharakteristik, die von einstufiger bis hin zu regelloser Belastung reichen kann, spiegeln sich in ihrer Gesamtheit allein in Versuchsergebnissen wider und lassen das Phänomen der Werkstoff- oder Materialermüdung sichtbar werden. Der Begriff der „Ermüdung“ beschreibt die grundlegende Eigenschaft eines Werkstoffes, bei einmaliger Belastung widerstandsfähiger zu sein verglichen mit einer gleichgroßen sich ständig wiederholenden Belastung. Seit dem Wissen über diese Erscheinung wird eine Erklärung dafür im strukturellen Aufbau der Werkstoffe und den während der Belastung mikroskopisch und makroskopisch ablaufenden Verformungsvorgängen gesucht. Die bisher zum großen Teil nicht bekannten und beschreibbaren werkstoffphysikalischen Vorgänge und Mechanismen der Schädigung im Werkstoff bedingen, daß Verfahren der rechnerischen Lebensdauer vorhersage zum gegenwärtigen Zeitpunkt mit teils erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

Es werden neben der experimentellen Ermittlung hauptsächlich fünf Konzepte zur Bestimmung der Betriebsfestigkeit angewendet:

- (1) das Nennspannungskonzept
- (2) das Strukturspannungskonzept
- (3) das Konzept der örtlich elastischen Beanspruchungen (Kerbspannungskonzept)
- (4) das Konzept der örtlichen Beanspruchungen (Kerbgrundkonzept, Örtliches Konzept)
- (5) das Rißfortschrittskonzept

Das Strukturspannungskonzept (2) wurde für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen entwickelt. Ein weites Anwendungsgebiet öffnet sich damit im Fahrzeug-, Schiff- und Behälterbau. Die Strukturspannungen - Spannungen, die sich an Schweißstößen direkt vor der Schweißnahtkerbe einstellen und die Geometrie- und Belastungsparameter widerspiegeln - können mittels Finiter Elemente Methode oder durch Dehnungsmessung bestimmt werden. Der eigentliche Nachweis erfolgt durch eine „Bewertung“ mit Strukturspannungswöhlerlinien.

Beim Konzept der örtlich elastischen Beanspruchungen (3) werden elastizitätstheoretische Zusammenhänge genutzt, um die örtlich auftretenden Spannungen an versagenskritischen Stellen des Bauteiles zu berechnen und sie den ertragbaren örtlichen Spannungen gegenüber-

zustellen. Je nach Geometrie und Belastung, die vollständig beschreibbar sein müssen, kommen analytische oder numerischen Verfahren für die Berechnung zum Einsatz. Das Kerbspannungskonzept wird sowohl für geschweißte als auch ungeschweißte Bauteile angewendet.

Grundannahme beim Rißfortschrittskonzept (5) ist das Vorhandensein von Anrissen am zu betrachtenden Bauteil. Als Beanspruchungsparameter unmittelbar vor der Rißspitze werden der Spannungsintensitätsfaktor bei kleinen plastischen Zonen oder das J-Integral bei größeren plastischen Zonen verwendet. Die Integration des Rißfortschrittsgesetzes, das den Zusammenhang zwischen dem Beanspruchungsparameter und der Rißfortschrittsrate da/dN beschreibt, von einer bekannten Anfangsrißlänge bis zur kritischen Rißlänge liefert die Versagensschwingspielzahl. Große Bedeutung besitzt das Rißfortschrittskonzept im Flugzeugbau zur Abschätzung der Restlebensdauer oder zur Bestimmung von Inspektionsintervallen. Die Anwendung des Rißfortschrittskonzeptes in Kombination mit dem Kerbgrundkonzept (4) bietet sich insbesondere dort an, wo mit einem großen Anteil der Rißfortschrittslebensdauer an der Gesamtlebensdauer zu rechnen ist (hohe Belastungen mit deutlichen Druckanteilen bei stark gekerbten Bauteilen).

Die Konzepte (1) und (4) werden im folgenden ausführlicher behandelt; die Konzepte (2), (3) und (5) werden nicht weiter verfolgt.

1 Zielstellung

Die Lebensdauer eines Bauteils hängt von Belastung, Werkstoff, Bauteilgeometrie, Fertigungs- und Umgebungszuständen ab. Sie kann bereits mit dem Auftreten eines Risses definierter Größe erreicht sein oder erst mit dem Bruch des Bauteiles.

Anliegen dieser Arbeit ist es, durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen und die Einbeziehung von Ergebnissen aus der Literatur Erkenntnisse über den Einfluß der Größen Belastung, Werkstoff und Bauteilgeometrie auf das Ermüdungsverhalten zu gewinnen und für eine Verbesserung der Treffsicherheit der rechnerischen Lebensdauerabschätzung zu nutzen.

Zwei Werkstoffe - eine Aluminiumknetlegierung und ein mikrolegierter Stahl - in verschiedener geometrischer Gestalt werden bei Biege- und Zug-Druck-Belastung untersucht. Die Belastungscharakteristik umfaßt ein breites Spektrum vom einfachen Zugversuch als quasistatischer Belastung bis zur regellosen Schwingbelastung an Werkstoffproben und gekerbten Proben. Die regellosen Belastungen werden durch konstruierte und praxisnahe Belastungs-Zeit-Verläufe ohne und mit ausgeprägten Mittellaständerungen repräsentiert.

Durch die Untersuchung von Werkstoffproben und gekerbten Proben - bei einstufiger und betriebsnaher Belastung - sollten werkstoffcharakteristische Verhaltensmuster im Ermüdungsgeschehen erkennbar werden, die es gestatten, einen multikorrelativen Zusammenhang zwischen der Lebensdauer einerseits sowie Belastung, Werkstoff und Bauteil andererseits zu finden. Die Berücksichtigung eines solchen Zusammenhanges im Nennspannungskonzept und die Verbesserung der Treffsicherheit dieses Lebensdauervorhersagekonzeptes sowie die Schaffung der experimentellen Grundlagen, um in weiterführenden Arbeiten das transiente¹ Materialverhalten in Konzepten auf der Basis örtlicher Beanspruchungen berücksichtigen zu können, stellen die Hauptziele dieser Arbeit dar. Außerdem sollen Lebensdauerabschätzungen mit dem Örtlichen Konzept und dem Verfahren der Lebensdauerprognose [ROCH92, HICK99] für konstruierte und praxisnahe Belastungs-Zeit-Verläufe durchgeführt werden. In

¹ Unter transient werden in dieser Arbeit die Phänomene Ver- und Entfestigung sowie Mittelspannungsrelaxation verstanden. Stellt sich kein stabilisierter Werkstoffzustand ein, können diese Phänomene bis zum Versagen der betrachteten Probe beobachtet werden.

Ergänzung der Arbeiten in [HICK99] steht dabei eine Abschätzung der Treffsicherheit der Lebensdauerprognose im Vordergrund.

2 Bauteil- und Reihenfolgeeinfluß - Untersuchungen in der Vergangenheit

Die 8-Stufen-Blockprogrammbelastung nach Gassner [GASS41] bildete lange Zeit die experimentelle Grundlage zur betriebsfesten Bemessung schwingend beanspruchter Bauteile. Diese Art der Belastung gestattet die blockweise Wiedergabe der Amplituden und Häufigkeiten der Schwingspiele einer gegebenen Belastungs-Zeit-Funktion¹. Die Reihenfolge der enthaltenen Schwingspiele konnte jedoch nicht berücksichtigt werden. Darin ist ein Grund zu sehen, daß bereits bei derartigen Blockprogrammversuchen Untersuchungen zum Reihenfolgeeinfluß durchgeführt wurden. Der Begriff der Reihenfolge bezieht sich allerdings auf die Blöcke innerhalb einer Teilfolge.

Arbeiten von Hardrath und Naumann [HARD60], Schijve [SCHI72], Lipp [LIPP68] und Lowak [LOWA85] widmeten sich den Lebensdauereinflüssen von Teilfolgenlänge und Anordnung der Blöcke innerhalb einer Teilfolge. Die Erkenntnisse aus diesen Arbeiten beziehen sich auf unterschiedliche Werkstoffe, Probenformen, Belastungsarten und -höhen. Sie sind aber nicht direkt miteinander vergleichbar und lassen keine allgemeingültigen Schlüsse zu. Offensichtlich ist jedoch die Anordnung der Blöcke von Bedeutung. Bei Blockordnung von klein nach groß (steigende Belastung) wurde eine Lebensdauerverkürzung, bei entgegengesetzter Ordnung (fallende Belastung) eine Lebensdauererhöhung beobachtet. Außerdem zeigt sich die Tatsache, daß die Verringerung des Teilfolgeumfanges im allgemeinen zu einer Lebensdauerverkürzung führt.

Mit der Entwicklung servohydraulischer Prüfmaschinen wurde die Grundlage geschaffen, Schwingspiele regellos und mit variablen Amplituden/Mittelwerten auf das zu prüfende Bauteil aufzubringen. Damit war es möglich, Lebensdauervergleiche zwischen Blockprogramm- und Zufallsbelastung anzustellen. Auswertungen umfangreicher experimenteller Daten ergaben, daß bei zufallsartiger Belastung die Lebensdauer annähernd um den Faktor 2 geringer ist als bei Blockprogrammbelastung [GASS84, HEUL86]. Für experimentelle Betriebsfestigkeitsnachweise wird deshalb heute vorrangig der Zufallslasten-Versuch verwendet.

¹ Gleichbedeutend wird der Begriff „Lastfolge“ verwendet, unter dem der zeitliche Ablauf der Belastungen in Form sogenannter Schwingspiele oder bei fehlender Zeitinformaton die Aufeinanderfolge von Lastumkehrpunkten verstanden wird.

Die Reihenfolge der Schwingspiele bei Zufallsbelastung mit konstanter Mittellast besitzt nach [SCHW83] keinen nennenswerten Einfluß auf die Lebensdauer sofern der Teilfolgeumfang ausreichend groß ist und keine „außergewöhnlichen“ Belastungen innerhalb der Folge enthalten sind. Aus den in [BUXB89] angestellten Untersuchungen bei Zufallsbelastung mit veränderlicher Mittellast lassen sich weitere Schlußfolgerungen ableiten. Dort wurden ausgehend von Rainflow-Matrizen zweier originaler Zufallslastfolgen zwei Zufallslastfolgen sowie zwei Lastfolgen in geordneter Form (nach Amplitude und Mittelwert) rekonstruiert. Während die Lebensdauer bei originaler und rekonstruierter „ungeordneter“ Lastfolge ähnlich ausfiel, wurde mit der geordneten Lastfolge etwa die doppelte Lebensdauer erreicht. Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in den Untersuchungen von [PERR87] wider, die mit anderen Werkstoffen, Probenformen, Lastfolgen und Belastungsarten durchgeführt wurden.

Mit dem Anpassungsverfahren [KOTT87] wurde für Zufallsbelastungen bei konstanter Mittellast eine Verbesserung der Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept erreicht¹. Das Verfahren ermöglicht die Berechnung einer der Schadensakkumulationsrechnung zugrundezulegenden Schädigungssumme auf der Grundlage lastfolge- und bauteilspezifischer Kenngrößen und einer Regressionsfunktion.

Vom Grundgedanken dem Anpassungsverfahren gleich, gelang mit dem Trennverfahren [OPPE97] auch für Zufallsbelastungen mit veränderlichen Mittellasten für das Nennspannungskonzept und das Kerbgrundkonzept² eine Verbesserung der Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung.

Allgemeine Empfehlungen zur Verwendung von sogenannten tatsächlichen Schädigungssummen $D \neq 1$, die der Schadensakkumulation zugrundegelegt werden müssen, um die Lebensdauer auf Basis von Nenn- oder Strukturspannungen treffsicherer abschätzen zu können, werden in [SONS90, SONS94] gegeben. Sie sind allerdings auf Zufallsbelastungen ohne ausgeprägte Mittellaständerungen beschränkt.

¹ Randbedingungen: Versagenskriterium Bruch, Biege- und Axialbelastung, Stahl- und Aluminiumlegierung, modifizierte MINER-Regel [HAIB70], Mittelspannungseinfluß durch HAIGH-Schaubild berücksichtigt

² Randbedingungen: Versagenskriterien technischer Anriß und Bruch, metallische, biegebelastete, nicht gefügte Bauteile ohne Oberflächennachbehandlung, Temperatur- und Korrosionseinfluß bleiben unberücksichtigt

Bezüglich der Reihenfolgewirkung existieren zahlreiche weitere Arbeiten, z.B. [SCHÜ76, NEUM84, VORM89, ROCH92, NOWA93].

Mehrere Abhandlungen über transientes Materialverhalten an ausgewählten Werkstoffen liegen mit [EIFL82, GLAS95, CHRI97] vor. Der Frage zum Einfluß des transienten Materialverhaltens bei der Lebensdauerabschätzung nach dem Örtlichem Konzept wurde in [WENZ99] nachgegangen. Ver- und Entfestigungsvorgänge sowie Mittelspannungsrelaxation wurden bei der Bestimmung des örtlichen Spannungs-Dehnungs-Verlaufes berücksichtigt. Für den Werkstoff Metasafe 900 (vergleichbar mit 27MnSiVS6) wurde nachgewiesen, daß die alleinige Einbeziehung der Mittelspannungsrelaxation zu keiner Verbesserung der Treffsicherheit der Lebensdauervorhersage führt. Nach [WENZ99] ist das für Prozesse mit ausgeprägten Mittelspannungsänderungen nur zu erwarten, wenn Ent- oder Verfestigungsvorgänge und Mittelspannungsrelaxation gemeinsam berücksichtigt werden.

Ein integrales Modell als Alternative zur schwingspielweisen Berücksichtigung des Reihenfolgeinflusses im Örtlichen Konzept wird in [WANG98] mit dem r-Verfahren vorgestellt. Das Verfahren beruht auf der Ermittlung einer bauteil- und lastfolgeabhängigen Werkstoffbelastbarkeit, die sich in der Modifikation der die Dehnungswöhlerlinie beschreibenden Parameter widerspiegelt. Für eine vergleichbare Datenbasis wurde bei Anwendung des r-Verfahrens im Örtlichen Konzept eine zum Nennspannungskonzept [EULI94] gleichwertige und gegenüber der Rechnung ohne r-Verfahren deutlich höhere Treffsicherheit in der Lebensdauerabschätzung erreicht.

Auf eine generelle Schwierigkeit bei der Schädigungsbewertung von Beanspruchungsprozessen mit veränderlichen Amplituden und Mittellasten wird in [KOTT93] hingewiesen. In Abhängigkeit der Reihenfolge der Lastamplituden und Mittellasten laufen im Kerbgrund Plastifizierungsvorgänge ab. In der Folge kommt es zu Mittelspannungsumlagerungen und zur Ausbildung von Eigenspannungszuständen und damit zu sich ständig ändernden Auswirkungen auf das Schädigungsverhalten des Werkstoffes. Eine Bewertung der Schädigung getrennt nach Reihenfolge- und Mittellastwirkung ist deshalb aus Sicht der Werkstoffmechanik kaum möglich.

3 Möglichkeiten der Lebensdauerabschätzung

3.1 Experimentelles Vorgehen

Die Ziele experimenteller Untersuchungen auf dem Gebiet der Betriebsfestigkeit sind

- die Ermittlung von werkstoffspezifischen Kenndaten als Eingangsgrößen für die rechnerische Lebensdauerabschätzung (quasistatischer und zyklischer Spannungs-Dehnungs-Verlauf, Werkstoffwöhlerlinien zur Beschreibung der Werkstoffbelastbarkeit).
- die Bestimmung der Bauteilbelastbarkeit (Bauteilwöhlerlinien)
- die Bestimmung der Lebensdauer bzw. Betriebsfestigkeit von Bauteilen (Lebensdauerlinien)

Diesen Zielen entsprechend werden Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung ausgelegt.

3.1.1 Werkstoff- und Bauteilbelastbarkeit

Zur Ermittlung des Zeit- und Dauerfestigkeitsverhaltens werden auf mehreren Beanspruchungshorizonten jeweils ein oder mehrere Prüflinge einer einstufigen Belastung mit bestimmten Werten der Amplitude, des Mittelwertes und der Frequenz bis zum Versagen (Anriß oder Bruch) unterzogen. Zur Auswertung der Versuchsergebnisse schließt sich eine Regression über alle Versuchspunkte an oder die Regression erfolgt erst nach einer Horizontauswertung. Bei dem zuletzt genannten Vorgehen kann über die Anzahl der Versuche je Horizont gewichtet werden. Bei Unterstellung einer Normalverteilung der logarithmierten Lebensdauerwerte auf einem Horizont wird hinsichtlich einer guten Anpassung der Verteilung an die vorhandenen Versuchsergebnisse und einer geringen Gefahr der Unterschätzung der Streuweite eine statistische Auswertung mit der ROSSOW-Schätzformel [ROSS64] (1) für Positionswahrscheinlichkeiten P_i im Wahrscheinlichkeitsnetz empfohlen [EULI94].

$$P_i = \frac{3 \cdot i - 1}{3 \cdot n + 1} \quad (1)$$

Das Ergebnis sind Anrißdehnungswöhlerlinien (an ungekerbten Proben ermittelt) und Spannungswöhlerlinien (an ungekerbten oder gekerbten Proben ermittelt), die zur analytischen

Beschreibung der Werkstoff- und Bauteilbelastbarkeit im Zeitfestigkeitsbereich mit dem MANSION-COFFIN-Ansatz [COFF50] (2) und einem Potenzansatz (3) für eine geforderte Überlebenswahrscheinlichkeit - meist 10%, 50% und 90% - abgebildet werden können.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2 \cdot N)^b + \varepsilon'_f \cdot (2 \cdot N)^c \quad (2)$$

$$N = N_D \cdot \left(\frac{S_a}{S_D} \right)^{-k} \quad (3)$$

Zur Bestimmung der Dauerfestigkeit eignet sich z.B. das Treppenstufenverfahren in der verbesserten Form nach HÜCK [HÜCK83].

3.1.2 Quasistatisches und zyklisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Zur Charakterisierung des quasistatischen und zyklischen Werkstoffverhaltens werden der statische Zugversuch und der Incremental-Step-Test¹ (IST) an jeweils mehreren ungekerbten Proben durchgeführt. Aus dem Zugversuch lassen sich die statischen Kennwerte (z.B. Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul) bestimmen. Der Incremental-Step-Test dient einerseits zur Ermittlung der Parameter des zyklischen Werkstoffgesetzes nach dem RAMBERG-OSGOOD-Ansatz [RAMB43] (4), andererseits lassen sich Aussagen über das transiente Materialverhalten ableiten. Abhängig vom Werkstoff stellt sich ein sogenannter stabilisierter Zustand nach einer bestimmten Zahl von Schwingspielen ein oder das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten ändert sich über die gesamte Lebensdauer. Deshalb wird für die Ermittlung der Kennwerte des RAMBERG-OSGOOD-Ansatzes der IST-Block bei 50% der Lebensdauer herangezogen.

¹ Zur Ermittlung der Kennwerte des zyklischen Werkstoffgesetzes können aber auch die Eckpunkte der Spannungs-Dehnungs-Hysteresen aus Einstufenbelastung verwendet werden, da diese Ergebnisse aus den Einstufenversuchen zur Bestimmung der Anrißdehnungswöhlerlinie vorliegen.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (4)$$

Aus (2) und (4) ergeben sich unmittelbar folgende Kompatibilitätsbedingungen (5). Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen den Werkstoffkonstanten zur Beschreibung der Dehnungswöhlerlinie und der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve.

$$K' = \frac{\sigma_f'}{(\varepsilon_f')^{n'}} \quad \text{und} \quad n' = \frac{b}{c} \quad (5)$$

Die Einhaltung dieser Bedingungen bei gleichzeitig befriedigender Beschreibung der experimentellen Daten ist aber nur zu erwarten, sofern diese Daten aus denselben (Einstufen)Versuchen stammen. Trotzdem ist die Erfüllung aus folgendem Grund nicht zwangsläufig gegeben. Den Ansätzen (2) und (4) ist die additive Verknüpfung der elastischen und plastischen Dehnungsanteile gemeinsam. Im RAMBERG-OSGOOD-Ansatz wird jedoch der Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang unabhängig von der Schwingspielzahl beschrieben.

3.1.3 Der Betriebsfestigkeitsversuch

Das Vorgehen beim Betriebsfestigkeitsversuch ähnelt dem bei der Ermittlung von Wöhlerlinien. An die Stelle der Einstufenbelastung treten jedoch Belastungs-Zeit-Funktionen, die entsprechend den Erfordernissen eine mehr oder wenige realitätsnahe Belastung des zu beurteilenden Bauteiles repräsentieren. Das Ergebnis des Versuches sind sogenannte Lebensdauerlinien, die sich über einen begrenzten Schwingspielzahlbereich häufig ebenfalls mit einem Potenzansatz (6) beschreiben lassen.

$$\bar{N} = \bar{N}_{bez} \cdot \left(\frac{\bar{S}_a}{\bar{S}_{bez}} \right)^{-\bar{k}} \quad (6)$$

3.1.4 Die Belastungs-Zeit-Funktion

Gleichbedeutend wird der Begriff „Lastfolge“ verwendet, unter dem der zeitliche Ablauf der Belastungen verstanden wird. Bei fehlender Zeitinformation entsteht aus der Lastfolge eine sogenannte Umkehrpunktfolge.

Häufig haben Belastungen von Bauteilen in der Praxis nicht nur eine Ursache. Es liegen zusammengesetzte Beanspruchungen vor, die nach Grund- und Zusatzbeanspruchungen oder auch nach deterministischen und nicht deterministischen zeitlichen Beanspruchungsabläufen [BUXB73] unterschieden werden. Eine ausführliche systematische Darstellung ist in [BUXB92] enthalten. Unter Grundbeanspruchungen, die konstant oder quasistatisch veränderlich sein können, fallen z.B. das Eigengewicht eines Fahrzeuges oder die zeitlich veränderliche Zuladung. Unter Zusatzbeanspruchungen lassen sich system- und umweltbedingte Schwingungsvorgänge (Fahrbahnunebenheiten, Motorschwingungen), Arbeitsvorgänge (Kurvenfahrten) und seltene Ereignisse (Bordsteinüberquerung) einordnen. Praxisnahe Belastungs-Zeit-Funktionen sind durch die Überlagerung von quasistatischen Grundbeanspruchungsänderungen oder Arbeitsvorgängen mit höherfrequenten Zusatzbeanspruchungen gekennzeichnet.

Zur Aufbereitung (Datenreduktion, Möglichkeit der Definition von Schädigungsereignissen) einer Lastfolge hinsichtlich einer rechnerischen Lebensdauerabschätzung sowie zur Charakterisierung der Lastfolge im Amplitudenbereich ist eine Analyse mittels Zähl- oder Klassierverfahren unerlässlich. In erster Linie interessieren die Beanspruchungshöhe und die Häufigkeit ihres Auftretens. Nach der Anwendung eines Zählverfahrens läßt sich allerdings die zeitliche Aufeinanderfolge der originalen Beanspruchungen nicht mehr rekonstruieren. Sollen Aussagen über den Frequenzinhalt einer Lastfolge getroffen werden, muß eine Analyse im Frequenzbereich erfolgen. Dies ist der Fall u.a. bei der Suche nach Eigenfrequenzen und der Trennung von zusammengesetzten Zeit-Funktionen nach ihren Ursachen.

Es existiert eine Vielzahl von ein- und zweiparametrischen Zählverfahren, bei denen während des Abarbeitens der Lastfolge ein oder zwei Ereignisparameter gezählt und anschaulich in Form einer Häufigkeitsverteilung¹ oder Häufigkeitsmatrix geordnet abgelegt werden. Aus

¹ Häufig wird auch der Begriff „Kollektiv“ verwendet.

Sicht der Betriebsfestigkeit ist das Zählverfahren vorzuziehen, welches die für die Lebensdauer verantwortliche Schädigung am zutreffendsten beschreibt. Gegenwärtig wird das Rainflow-Zählverfahren [MATS68] als solches allgemein anerkannt. Nicht zu unterschätzen sind jedoch die in großem Umfang vorliegenden Erfahrungen bei der Lebensdauerabschätzung auf der Grundlage einparametrischer Zählverfahren wie z.B. der Bereichspaarzählung oder der Klassengrenzenüberschreitungs-zählung.

Neben der Beanspruchungshöhe und Häufigkeit lassen sich aus der Häufigkeitsverteilung weitere Lastfolgekenwerte angeben. Im Hinblick auf die weiteren Ausführungen seien an dieser Stelle einige Kennwerte zusammengestellt:

Lastverhältnis \bar{R}

$$\bar{R} = \frac{\bar{L}_u}{\bar{L}_o} \quad (7)$$

Effektivwert X_{RMS} einer Last-Zeit-Funktion $x(t)$ während der Integrationszeit T [RICE44]

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2(t) \cdot dt} \quad (8)$$

Crestfaktor als Verhältnis von Kollektivhöchstwert und Effektivwert [PRES56]

$$C_r = \frac{X_{\text{max}}}{X_{\text{RMS}}} \quad (9)$$

Völligkeit einer Häufigkeitsverteilung, nach TGL-Norm 82

$$V = \sqrt[6]{\frac{\sum \left[n_i \cdot \left(\frac{x_i}{x_{\max}} \right)^6 \right]}{\sum n_i}} \quad (10)$$

n_i : Anzahl der Schwingspiele der Stufe i der Häufigkeitsverteilung

x_i : Wert der Stufe i der Häufigkeitsverteilung

x_{\max} : Maximalwert der Häufigkeitsverteilung

Mit Gleichung (10) lassen sich die Völligkeiten V_{\max} und V_{\min} der Extremwertverteilungen und die Völligkeit V_a der Amplitudenverteilung berechnen. Die mittlere Völligkeit V_m ist definiert als

$$V_m = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \quad (11)$$

Als Mittelspannungsverhältnis MV [KOTT87] wird das Verhältnis von Amplituden- zur mittleren Völligkeit definiert:

$$MV = \frac{V_a}{V_m} \quad (12)$$

3.2 Rechnerische Lebensdauervorhersagemodelle

Die verschiedenen Verfahren zur rechnerischen Lebensdauerabschätzung sind in der Fachliteratur ausführlich behandelt, so daß hier nur in Grundzügen auf die Konzepte eingegangen wird.

3.2.1 Das Nennspannungskonzept

Zur Beschreibung der vorhandenen und ertragbaren Beanspruchungen werden bei diesem Konzept als schädigungsrelevante Größe Nennspannungen verwendet. Die Belastung muß in Form der Häufigkeitsverteilung oder -matrix der Lastfolge gegeben sein, die Belastbarkeit durch Nennspannungswöhlerlinien. Spannungsüberhöhungen durch vorhandene Kerben am versagenskritischen Querschnitt sind in den Nennspannungswöhlerlinien berücksichtigt. Die Bewertung von mittelspannungsbehafteten Schwingspielen wird meist durch Transformation auf Amplituden für die Mittelspannung Null mit Hilfe des HAIGH-Schaubildes und der Mittelspannungsempfindlichkeit [SCHÜ67] vorgenommen. Die Schadensakkumulation erfolgt üblicherweise nach der von PALMGREN [PALM24], LANGER [LANG37] und MINER [MINE45] beschriebenen linearen Schadensakkumulationshypothese bis zur Schädigungssumme $D = 1$. Die Beantwortung der Frage nach der Beurteilung von Schwingspielen unterhalb der Dauerfestigkeit führt zur Anwendung einer der vielen Modifikationen der sogenannten originalen MINER-Regel, bei welcher Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit nicht zur Schädigung beitragen. Bei der elementaren MINER-Regel [CORT56] wird die Wöhlerlinie mit der gleichen Neigung wie im Zeitfestigkeitsbereich bis zur Spannungsamplitude Null fortgesetzt. In der nach HAIBACH modifizierten Regel [HAIB70] wird ein Dauerfestigkeitsabfall infolge Vorschädigung näherungsweise berücksichtigt, indem die Wöhlerlinie mit einer fiktiven Neigung $2 \cdot k - 1$ aus dem Zeitfestigkeitsbereich fortgesetzt wird. Der gleiche Grundgedanke liegt der konsequenten MINER-Regel [GNIL80, HAIB89] zugrunde. Durch eine Schädigungssummation bis zur jeweils aktuellen Dauerfestigkeit erfolgt hier ein asymptotischer Übergang der Lebensdauerlinie aus dem Zeitfestigkeitsbereich zur Dauerfestigkeit. Anwendung findet auch die relative MINER-Regel [SCHÜ73], bei der anstelle der Schädigungssumme $D = 1$ eine auf Erfahrungen für ähnliche Bauteile und Belastungen beruhende Schädigungssumme $D \neq 1$ der Schadensakkumulation zugrundegelegt wird.

Durch die Schädigungsrechnung mit einer Bezugswöhlerlinie nach einem Vorschlag von Liu/Zenner [ZENN92] wird versucht, das unterschiedliche Schädigungsverhalten während der Rißentstehungs- und der Rißfortschrittsphase zu berücksichtigen. Die Bezugswöhlerlinie wird bestimmt durch die Drehung der Bauteilwöhlerlinie um den Kollektivhöchstwert und die Berechnung eines neuen Neigungsexponenten durch Mittelung des Exponenten der Bruchwöh-

lerlinie ($k > 3,6$) und des Exponenten 3,6 der Rißfortschrittswöhlerlinie. Die Schadensakkumulation erfolgt wie bei der originalen MINER-Regel. Die anzusetzende Dauerfestigkeit ist jedoch nur noch halb so groß wie die eigentliche Dauerfestigkeit.

Abhängig von dem der Nennspannungswöhlerlinie zugrundeliegenden Versagenskriterium gestattet das Nennspannungskonzept eine Lebensdauerabschätzung für die Versagenskriterien Anriß und Bruch.

3.2.2 Das Örtliche Konzept

Im Örtlichen Konzept werden auf Basis des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens die örtlichen Spannungen und Dehnungen an der versagenskritischen Stelle in einer sogenannten Kerbsimulationrechnung bestimmt und den örtlich ertragbaren Spannungen und Dehnungen gegenübergestellt. Das heißt, der Bruch des Werkstoffelementes an der höchstbeanspruchten Stelle des Bauteiles definiert den Ausfall des Bauteiles. Damit stellt das Örtliche Konzept ein Werkzeug zur Lebensdauerabschätzung für das Versagenskriterium Anriß dar. Als Eingangsdaten müssen belastungsseitig die Belastungs-Zeit-Funktion und werkstoffseitig die Werkstoffbelastbarkeit in Form der Anrißdehnungswöhlerlinie sowie ein zyklisches Spannungs-Dehnungs-Gesetz bereitgestellt werden. Außerdem muß eine geeignete Übertragungsfunktion gewählt werden, die den Zusammenhang zwischen den äußeren Lasten und den sich örtlich einstellenden Spannungen und Dehnungen herstellt. Solche Last-Dehnungs-Zusammenhänge, die auch als Bauteilfließkurven bezeichnet werden, können aus elastisch-plastischen Finite-Elemente-Rechnungen, aus Dehnungsmessungen am anrißgefährdeten Ort oder aus analytisch abgeleiteten Näherungsbeziehungen gewonnen werden. Wie im Nennspannungskonzept ist auch der Mittelspannungseinfluß zu berücksichtigen. Das erfolgt durch die Wahl eines geeigneten Schädigungsparameters und die Umrechnung der Anrißdehnungswöhlerlinie in eine Schadensparameterwöhlerlinie. Der komplette örtliche Spannungs-Dehnungs-Pfad ergibt sich durch Abarbeiten der Lastfolge mit dem Rainflow-Zählverfahren und Berücksichtigung des MASING- und Memoryverhaltens [MASI26, CLOR85] des Werkstoffes. Jede geschlossene Hysterese wird mit der Schadensparameterwöhlerlinie hinsichtlich ihrer Schädigung bewertet. Die Schadensakkumulation erfolgt analog zum Nennspannungskonzept.

3.2.3 Die Lebensdauerprognose

Zur kurzen Beschreibung der Lebensdauerprognose, die nicht zu den allgemein bekannten und in der Praxis angewendeten Verfahren zu zählen ist, hier aber zur Ergänzung der Arbeiten in [HICK99] verwendet wird, sei aus [HICK99] zitiert:

„Das Verfahren der Lebensdauerprognose ist ein erfahrungsbasiertes Verfahren. Die Verwendung von Versuchsergebnissen für die Ableitung der Regressionsfunktion zur Lebensdauerabschätzung von Bauteilen unter zyklischer Belastung stellt sich im Vergleich zu anderen Verfahren als treffsicher und robust dar. So reagiert die Lebensdauerprognose deutlich unempfindlicher gegenüber ungenauen Eingangsgrößen als das Örtliche Konzept mit dem P_{SWT} -Schadensparameter [SMIT70]. Der Lebensdauerprognose liegt dabei auch eine örtliche Betrachtungsweise zugrunde, die durch eine Kerb-Dehnungs-Simulation unter Verwendung des elastischen Übertragungsverhaltens und eine Kerbgrundnäherung realisiert wird. Es ist für den Einsatz in der Konstruktionsphase geeignet, weil es mit wenigen, leicht bestimmbar Kennwerten auskommt (Schätzung der zyklischen Kenngrößen mit dem Uniform Material Law [BÄUM90]). Die einzige aufwendigere Eingangsgröße ist die auf das Bauteil wirkende Belastung. Sie muß in Form einer Lastfolge vorliegen. Das elastische Übertragungsverhalten, notwendig für die Kerbsimulation, kann numerisch bestimmt werden.“

Von seiner Konzeption her erlaubt das Verfahren eine Lebensdauerabschätzung für die Versagenskriterien Anriß und Bruch. Ergebnisse können deshalb direkt mit denen aus dem Nennspannungskonzept und dem Örtlichen Konzept verglichen werden.

4 Experimentelle Basis

Zur Schaffung einer breiten und zuverlässigen Datenbasis wurde sowohl auf bereits vorhandene Versuchsergebnisse zurückgegriffen [BUXB95] als auch ein umfangreiches Versuchsprogramm erarbeitet und im Rahmen eines Forschungsvorhabens [KOTT00] an der Technischen Universität Dresden und am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF Darmstadt realisiert.

4.1 Werkstoffe und Probenformen

In die experimentellen Untersuchungen wurden die hochfeste aushärtbare Aluminiumknetlegierung AlCuMg₂ (2024-T3) und der schmiedeperlitische mikrolegierte Stahl Metasafe 900 (vergleichbar mit 27MnSiVS6) einbezogen. Maßgebend für die Wahl dieser Werkstoffe waren die unterschiedlichen Eigenschaften bezüglich Verfestigung und Entfestigung, die gegenüber Metasafe 900 hohe Mittelspannungsempfindlichkeit von AlCuMg₂ [SCHÜ76] und bereits vorliegende Ergebnisse aus [BUXB95]. Für beide Werkstoffe standen je zwei Halbzeuge - rund und flach - zur Verfügung, aus denen abgesetzte Wellen (Formzahlen 1,5 und 2,2) für Biegebelastung und gelochte Flachproben (Formzahlen 2,5 und 3,6) sowie ungekerbte Rund- und Flachproben für Zug-Druck-Belastung gefertigt wurden, siehe Tab. 1 bis Tab. 3 sowie Abb. 1. Die Werkstoffkennwerte¹ sind in den Tab. 4 bis Tab. 6 zusammengestellt. Für die Durchführung der Versuche an den (ungekerbten) Werkstoffproben und gekerbten Flachproben kamen servohydraulische Prüfmaschinen mit Maximalkräften von 40kN bis 100kN zum Einsatz. Die Schwingfestigkeitsversuche an den abgesetzten Wellen wurden in Mehrfach-Prüfeinrichtungen durchgeführt. Deren Wirkungsprinzip und der Versuchsaufbau sind in Abbildung 1 dargestellt. Mit diesen Prüfmaschinen konnten bis zu 10 abgesetzte Wellen gleichzeitig geprüft werden.

¹ experimentell ermittelt und aus dem Uniform Material Law abgeschätzt

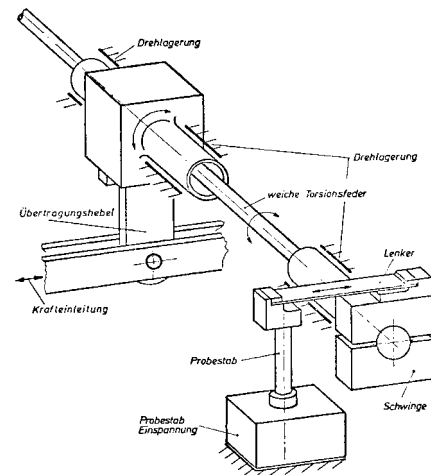


Abbildung 1 Versuchsaufbau und Wirkungsprinzip einer Mehrfach-Prüfeinrichtung

In allen Ausführungen dieser Arbeit werden die Formzahlen aller Probenformen auf eine Nachkommastelle gerundet angegeben. Die Werte für die gelochten Flachstäbe wurden aus [OSTE71] übernommen. Wie sich im Lauf der Arbeiten herausstellte, stimmt die dort ausgewiesene Formzahl 3,6 jedoch nicht mit Rechnungen überein, die im Sinne der Vergleichbarkeit mit dem an der TU Dresden entwickelten Programmsystem ALPHA [HELL89] für alle Formzahlen durchgeführt wurden. Das Programmsystem ALPHA, Zitat¹: „wurde für die spezielle Problemklasse "Ebene und rotationssymmetrische Bauteile mit konstruktiven Kerben" entwickelt. Infolge dieser Spezialisierung ist es äußerst leistungsfähig und effektiv. Es ermöglicht für derartige Bauteile die Ermittlung der Spannungs-, Verformungs- und Verzerungsfelder unter statischer Belastung bei linearelastischem Materialverhalten.“ Mit diesem Programm wurde im Unterschied zur Finite-Elemente-Rechnung nach [OSTE71] eine Formzahl von 3,48 berechnet. Um Formzahlen zu verwenden, die auf demselben Rechenalgorithmus basieren, erfolgten die Lebensdauerberechnungen mit den Formzahlen „Formzahl Rechnung“ entsprechend Tabelle 1. Angegeben sind hier auch die bezogenen Spannungsgefälle χ^* , die ebenfalls mit ALPHA berechnet wurden und per Definition negativ sind.

¹ [EULI99-1]

	gerundete Formzahl	Formzahl Rechnung	bezogenes Spannungsgefälle
abgesetzte Welle, Biegung	1,5	1,49	-0,56
	2,2	2,19	-1,39
gelochter Flachstab, Zug-Druck	2,5	2,53	-0,62
	3,6	3,48	-1,07

Tabelle 1 Formzahlen und bezogene Spannungsgefälle

4.2 Anrißerkennung

Trotz Literaturstudiums konnte zum bekannten und bereits in [BUXB95] verwendeten Silberleitlackverfahren keine praktikable Alternative für die Anrißerkennung bei den abgesetzten Wellen gefunden werden. Zu Beginn der Untersuchungen wurden zur Verbesserung dieser Methode umfangreiche Vorstudien durchgeführt, die letztlich bei beiden Werkstoffen zu nachweislich zuverlässigerer Anrißdetektion als in [BUXB95] führten. Tendenziell waren für AlCuMg2 tiefere detektierte Anrisse ($a_0 \approx 1,5\text{mm}$) zu beobachten als für Metasafe 900 ($a_0 < 1\text{mm}$). Für die Anrißerkennung bei den gelochten Flachstäben erwies sich die Anwendung von Lochaufweitungsaufnehmern als zweckmäßig [HAIB80].

• Anrißerkennung - abgesetzte Welle

Zur Anwendung kommt das Silberleitlackverfahren der Firma SWIFT GmbH. Während beim alten Verfahren drei Schichten - Grundierung, Lackierung, Silberleitlack - aufgebracht werden mußten, wurde auf die Lackschicht beim neuen Verfahren bei gleichzeitig anderen Komponenten Silberleitlack und Grundierung (1K-Füllprimer) verzichtet. Es kamen auf Nitro basierender und wasserlöslicher Silberleitlack zur Anwendung. Ersterer verhielt sich sehr aggressiv gegenüber der Grundierung. Häufig waren Kurzschlüsse zwischen Silberleitlack und Probenoberfläche die Folge. Aus diesem Grund wurde zu wasserlöslichem Silberleitlack übergegangen. Eine weitere Schwachstelle stellte der Übergang zum Lötstützpunkt dar. War dieser zu abrupt, riß der Silberleitlack unter Versuchsbedingungen zuerst an dieser Stelle. Dieser Mangel war zwar noch während des Versuches zu beheben, aber zu zeitaufwendig und

umständlich. Abhilfe schaffte hier die Anfasung des Trägermaterials. Verändert wurde auch die Führung der Leitlackspur durch den Radiusbereich. Anfangs wurde der Radius zweimal durchlaufen, mit dem neuen Vorgehen viermal. Nach 24-stündiger Lufttrocknung der Leitlackspur stellte sich ein elektrischer Widerstand von etwa 20Ω ein. Ein lebensdauererhöhender oder -verkürzender Einfluß der Zeitspanne zwischen Aufbringen der Anrißerkennung und Versuchsbeginn bzw. Probenbruch konnte nicht nachgewiesen werden.

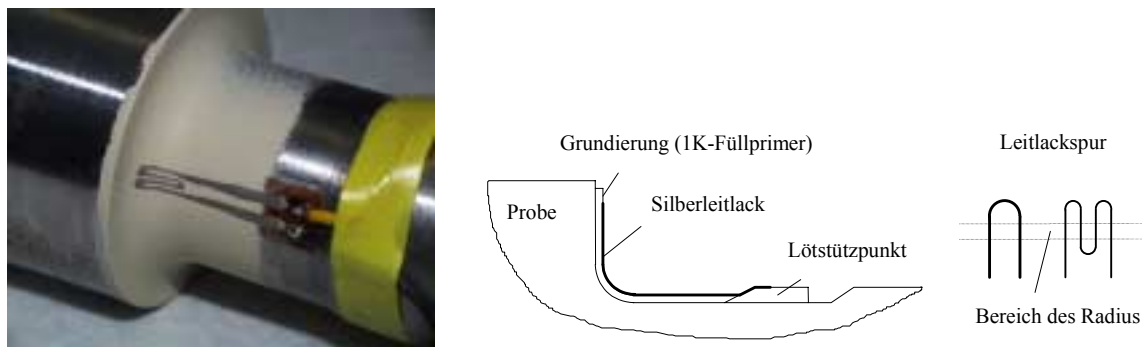


Abbildung 2 Anrißerkennung an einer abgesetzten Welle

Um die Zuverlässigkeit des Verfahrens zu überprüfen, wurden abgesetzte Wellen aus AlCuMg2 und Metasafe 900 im Einstufenversuch bis zur Detektierung eines Anrisses belastet, anschließend in ihrer Längsachse halbiert und, bei Metasafe 900 nach Abkühlung im flüssigen Stickstoff, gewaltsam gebrochen. Die Anrißlinien waren somit sichtbar und konnten in einem Komparator vermessen werden. Die Ergebnisse für 8 Proben aus Metasafe 900 sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Auch während der Versuchsreihen wurden stichprobenartig Proben nach Anrißdetektierung ausgebaut und die Tiefe des Anrisses festgestellt.

Proben-Nr.	Anriß detektiert	größte Anrißtiefe senkrecht zur Oberfläche [mm]	Proben-Nr.	Anriß detektiert	größte Anrißtiefe senkrecht zur Oberfläche [mm]
43aw	unten	0,3	93aw	oben	0,8
44aw	oben	0,7	94aw	unten	0,8
45aw	oben	0,5	95aw	unten	1,6
46aw	oben	0,8	96aw	unten	0,7

Tabelle 2 Anrißtiefen an abgesetzten Wellen aus Metasafe 900

Die erkannten Anrisse im Bruchquerschnitt weisen

- bei AlCuMg2 eine ca. 1 bis 2mm in das Material reichende, kreisrunde,
- bei Metasafe 900 eine nahe der Probenoberfläche liegende, langgestreckte

Form auf.

Ferner wurde für abgesetzte Wellen aus AlCuMg2 die Anrißerkennung über eine berührungslose Wegmessung auf Wirbelstrombasis realisiert. In einem definierten Abstand zur Probenoberfläche wurde an je zwei Proben einer Versuchsreihe ein Wirbelstromsensor mit einer Halterung positioniert. Die Sensoren sind über Steckverbindungen mit den Verstärkern verbunden. Im Versuch registriert der Sensor die Bewegung der Probenoberfläche über induzierte elektrische Felder. Ein sich bildender Anriß wird über eine Wegzunahme festgestellt. Mit diesem Verfahren wurden Anrisse zuverlässig und der gleichen Größenordnung wie mit dem Silberleitlackverfahren erkannt.

- Anrißerkennung - gelochter Flachstab

Der Lochaufweitungsaufnehmer ist ein mit Dehnungsmeßstreifen bestückter Meßbügel aus Federstahl. Die Meßspitzen liegen unter leichter Vorspannung in der Längsachse des Probestabes an der Lochlaibung an, siehe Abbildung 3. Das unter Belastung des Probestabes mit

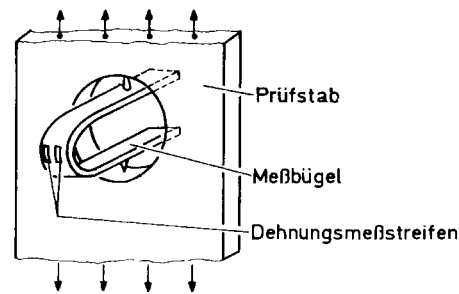


Abbildung 3 Anrißerkennung an einem gelochten Flachstab

dem Aufnehmer gemessene Dehnungssignal ist ein Maß für die Verformung der Bohrung. Solange sich das Verformungsverhalten der Bohrung nicht ändert, besteht zwischen der äußeren Last und dem Meßsignal eine konstante Beziehung. Wenn Ermüdungsvorgänge an der Lochoberfläche einen Anriß initiieren, ändert sich das Verformungsverhalten der Bohrung und damit die Beziehung zwischen Dehnungs- und Kraftsignal. Zur Anrißerfassung werden deswegen während des Versuches das Dehnungs- und Kraftsignal erfaßt und elektrisch kompensiert, so daß am Meßausgang ein „Null-Signal“ gemessen wird. Mit Entstehen und Fortschreiten eines Anrisses weicht dieses Signal zunehmend von Null ab. Sobald eine erkennbare Abweichung festgestellt wird, wird die zu diesem Zeitpunkt erreichte Schwingspielzahl als technische Anrißlebensdauer festgehalten. Mit diesem Verfahren wurden bei gelochten Flachstäben technische Anrisse von $a_0 \approx 0,3$ mm bis 0,5 mm erkannt.

4.3 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm, Tab. 7 bis Tab. 9 berücksichtigt die im Forschungsvorhaben [BUXB95] bereits vorhandenen Ergebnisse. Als Ergänzung wurden Versuche zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte im Hinblick auf die späteren Lebensdauerberechnungen durchgeführt. Hier wurden für die aktuellen Chargen und beide Halbzeuge die Versuche zur Beschreibung des zügigen (nicht für AlCuMg2) und zyklischen Werkstoffgesetzes und der Anrißdehnungswöhlerlinien neu durchgeführt. Mitteldehnungsfreie und -behaftete Ein- und Mehrstufenversuche an ungekerbten Proben waren den grundsätzlichen Untersuchungen zum

zeitabhängigen Werkstoffverhalten vorbehalten. Eine Serie von Vorversuchen mit abgesetzten Wellen diente zur Verbesserung der Anrißerkennung, zur Einschätzung der Chargeneinflüsse und zum stichprobenartigen Vergleich mit Ergebnissen aus [BUXB95]. Für die Formzahl 3,6 wurden Wöhlerlinien sowie Lebensdauerlinien für die Lastfolgen LF1-1, LF1-0 und LF3 (vgl. dazu Abschnitt Lastfolgen) ermittelt, da der Literatur keine Ergebnisse entnommen werden konnten. Randomversuche für alle vier Formzahlen mit einer praxisnahen Lastfolge und daraus abgeleiteten Varianten rundeten das Programm ab, um die Wirkung zufallsartiger Mittellaständerungen untersuchen zu können.

4.4 Lastfolgen

Ausgangspunkt für die Untersuchung zufallsartiger Lastfolgen bildete die praxisnahe Lastfolge CARLOS¹ [SCHÜ90]. CARLOS ist eine Standardlastfolge zur Schwingfestigkeitsbeurteilung von PKW-Radaufhängungsteilen. Von besonderem Interesse war die Lastfolge CARLOS-Seitenkraft (Lateral), im folgenden CARLOS-V0 genannt, weil sie ausgeprägte, durch Fahrmanöver bedingte, diskontinuierliche zufallsartige Mittellaständerungen enthält. Das Filterverfahren der Cosinus-Glättung [KLÄT85] wurde verwendet, um die Zusatzbelastungen von den Mittellaständerungen zu trennen und davon ausgehend drei weitere Lastfolgen CARLOS-V1, CARLOS-V2 und CARLOS-V3 zu generieren. Die Lastfolgen CARLOS-V2 und CARLOS-V3 entstanden durch Überlagerung der Lastfolge CARLOS-V1 mit der aus der Filterung erhaltenen Mittellast-Lastfolge, wobei Intensität und Häufigkeit der Mittellasten variiert wurden. Tabelle 3 enthält eine Kurzcharakteristik.

Lastfolge	$H_v = H_{l,z} / H_{l,m}$	$I_v = S_{a,max,z} / S_{a,max,m}$
CARLOS-V0	10 : 1	1 : 0,9
CARLOS-V1	mittellastfreie Zusatzbelastungen von CARLOS-V0	
CARLOS-V2	100 : 1	1 : 0,9
CARLOS-V3	10 : 1	1 : 2

Tabelle 3 Kurzcharakteristik der Lastfolgen CARLOS-V0, V1, V2 und V3

¹ CARLOS - CAR LOading Standard

H_V und I_V sind Verhältnisse¹ der Häufigkeiten und Intensitäten von Zusatz- und Mittellasten. Die Abb. 2 bis Abb. 16 zeigen Ausschnitte der Last-Zeit-Funktionen, die Markov- und Rainflow-Matrizen und die Extremwert- sowie Amplitudenkollektive der Lastfolgen. An beiden Orten der Versuchsdurchführung wurden nicht identische Lastfolgen CARLOS-V1, CARLOS-V2 und CARLOS-V3 verwendet. Die Unterschiede gehen aus der Belegung der Markov- und Rainflow-Matrizen, Abb. 7 bis Abb. 12, sowie den Lastfolgekennwerten hervor. Zur Unterscheidung erscheinen ausschließlich in diesen Darstellungen die Zusätze (LBF) und (TUD); ansonsten gilt: CARLOS-V1, V2 und V3 (LBF) bei AlCuMg2-Proben und CARLOS-V1, V2 und V3 (TUD) bei Metasafe 900-Proben. In den Lebensdauerberechnungen wurden konsequenterweise die entsprechenden Lastfolgen zugrundegelegt, um Versuchs- und Rechenergebnisse auf die gleiche Belastung zurückzuführen. Weil bei den Untersuchungen keine Vergleiche zwischen den Werkstoffen gezogen werden, sind diese Unterschiede in den Lastfolgen bedeutungslos.

Weitere untersuchte Lastfolgen waren die im Rahmen von [BUXB95] entstandenen sogenannten konstruierten Folgen LF1, LF2, LF3, LF4, LF6 und LF7. Sie sind im folgenden kurz beschrieben und in einer Systematik dargestellt, vgl. Abbildung 4.

LF1: 1-1: stationäre Gauß'sche Zufallsfolge mit der Regelmäßigkeit $i = 0,99$ und einem Umfang von 101.000 Schwingspielen, Spannungsverhältnis -1

Bezeichnung der Lastfolge: LF1-1

1-0: stationäre Gauß'sche Zufallsfolge mit der Regelmäßigkeit $i = 0,99$ und einem Umfang von 101.000 Schwingspielen, aber konstante Zugmittellast in Höhe des Amplitudenkollektivhöchstwertes der Folge LF1, Spannungsverhältnis 0

Bezeichnung der Lastfolge: LF1-0

LF2: Überlagerung einer normalverteilten Basisfolge (2 Durchläufe von LF1) und einer zwischen zwei Lasthorizonten aller 1.000 Schwingspiele umschaltenden Mittellast, ein Mittellasthorizont liegt im Zugbereich in Höhe des Amplitudenkollektivhöchstwertes der Basislastfolge, der andere besitzt die Mittellast null, Umfang 202.000 Schwingspiele, Spannungsverhältnis -0,5

¹ Mit derselben Bedeutung werden die Begriffe Frequenz- und Spannungsintensitätsverhältnis [WIRT71, SVEN72] verwendet.

LF3: Überlagerung einer normalverteilten Basisfolge (2 Durchläufe von LF1) und einer zwischen zwei Lasthorizonten aller 1000 Schwingspiele umschaltenden Mittellast, jeweils betragsgleich mit dem Amplitudenkollektivhöchstwert der Basislastfolge liegt ein Mittellasthorizont im Zugbereich der andere im Druckbereich, Umfang 202.000 Schwingspiele, Spannungsverhältnis -1

LF4: wie LF3, aber pro Mittellastabschnitt im Druckbereich wird nur das Schwingspiel mit der größten Amplitude beibehalten

LF6: wie LF2, aber Mittellast wechselt aller 100 Schwingspiele

LF7: wie LF2, aber Mittellast wechselt aller 10.000 Schwingspiele

Die Markov- und Rainflow-Matrizen und die Extremwert- sowie Amplitudenkollektive dieser Lastfolgen sind in [BUXB95] zusammengefaßt.

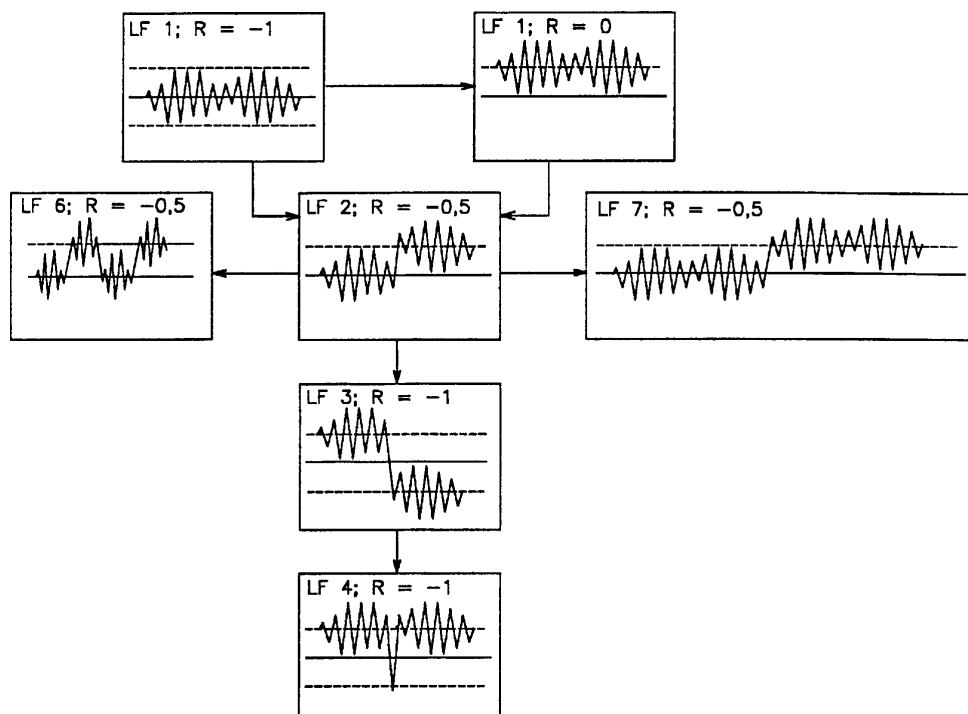


Abbildung 4 Systematik der Lastfolgen mit deterministischen Mittellaständerungen

Die wesentlichen Kenngrößen aller Lastfolgen und Rainflow-Matrizen enthalten die Tab. 10 und Tab. 11.

Lastfolgen wurden auch für dehnungskontrollierte¹ Mehrstufenversuche mit ungekerbten Proben genutzt. Anliegen war, die Werkstoffreaktionen auf veränderliche Mitteldehnungen darzustellen. Geeignet erschien eine Überlagerung einer Rechteckfolge von Mitteldehnungen mit sinusförmigen Schwingspielen. Durch Variieren

- der Höhe der Mitteldehnungen: 2‰, 3‰, 4‰ und 5‰,
- der Amplituden der überlagerten Schwingspiele: 3‰, 4‰, 5‰ und 6‰ und
- der Anzahl der Schwingspiele: 10, 25, 50 und 100 pro Mitteldehnungsabschnitt

entstanden mehrere Lastfolgen, siehe Abbildung 5.

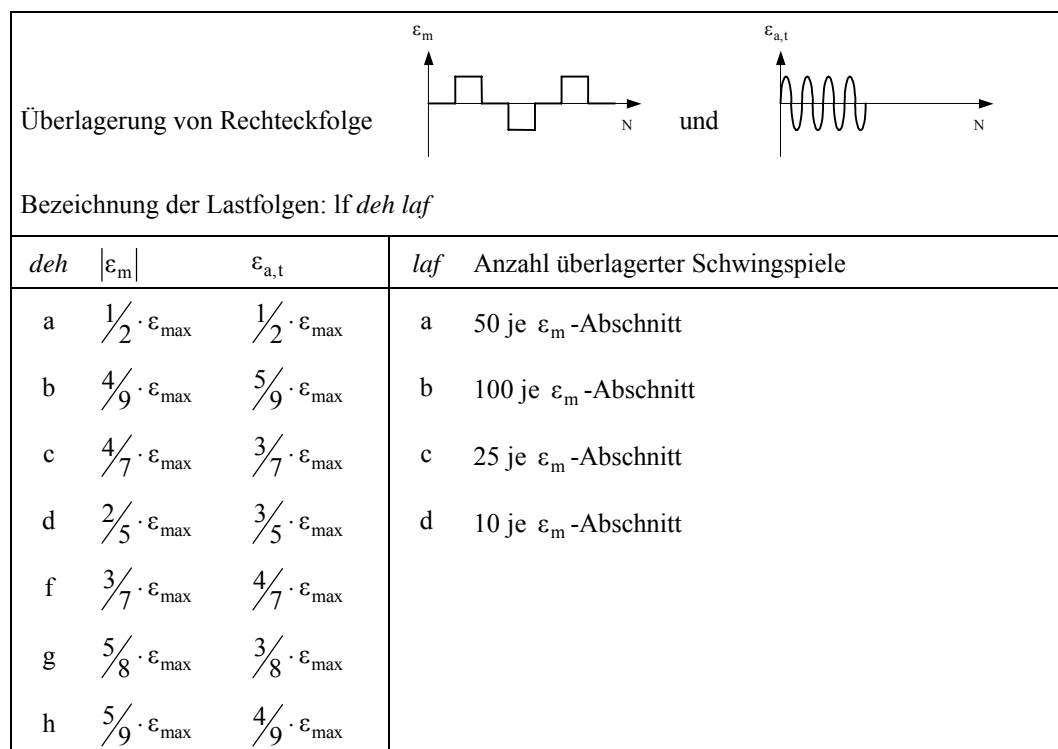


Abbildung 5 Lastfolgen für dehnungsgesteuerte Versuche

¹ Gebräuchlich ist auch der Begriff „dehnungsgesteuert“.

4.5 Versuchsergebnisse

4.5.1 Quasistatisches und zyklisches Werkstoffverhalten, Dehnungswöhlerlinien

Aus den statischen Zugversuchen¹ und dehnungskontrollierten Incremental-Step-Tests wurden die für die rechnerische Lebensdauerabschätzung benötigten statischen und zyklischen Werkstoffkennwerte bestimmt, vgl. Tab. 4 und Tab. 5. Die in den Incremental-Step-Tests aufgenommenen Spannungs-Dehnungs-Hysteresen bildeten die Grundlage zur Ermittlung der zyklischen Werkstoffparameter des RAMBERG-OSGOOD-Ansatzes (4). Dem ermittelten (zyklischen) Elastizitätsmodul E liegen zugrunde die für 10%, 20%, ..., 90% der Lebensdauer bestimmten E-Moduln aus den Wertepaaren, die der Forderung $|\epsilon_{a,t}| < 3\text{‰}$ für AlCuMg2 und $|\epsilon_{a,t}| < 1\text{‰}$ für Metasafe 900 genügen. Der E-Modul beider Werkstoffe ist zeitlich konstant bzw. ermüdungsunabhängig. Bei beiden Werkstoffen stellt sich während der Belastung kein stabilisierter Zustand ein. Die Parameter K' und n' resultieren aus der Regression über die Wertepaare der IST-Blöcke bei 50% der Anrißlebensdauer.

Die Dehnungswöhlerlinie gibt den Zusammenhang zwischen Totaldehnungsamplituden und bis zum Anriß ertragenen Schwingspielen N_A wieder. Die Kennwerte σ'_f , b , ϵ'_f und c zur analytischen Beschreibung dieses Zusammenhanges mit dem MANSON-COFFIN-Ansatz (2) wurden aus einer Regressionrechnung bestimmt. Als Kriterium für die durchgeführten Regressionsrechnungen wurde das Minimum der Fehlerquadrate in Lebensdauerrichtung gewählt.

Beiden Ansätzen ist die additive Verknüpfung der elastischen und plastischen Dehnungsanteile gemeinsam, woraus unmittelbar Kompatibilitätsbedingungen resultieren. Mit Hilfe einer nichtlinearen Optimierung wurde der Versuch einer Anpassung der Funktionen (2) und (4) an die experimentellen Daten unter Einhaltung der Kompatibilitätsbedingungen unternommen, der jedoch nur für Metasafe 900 physikalisch sinnvolle Ergebnisse lieferte. Das negative Ergebnis für AlCuMg2 ist zum einen auf die unbefriedigende Beschreibung der Werkstoffbelastbarkeit zurückzuführen, vgl. Abb. 20, zum anderen durch numerische Probleme bei der Behandlung des RAMBERG-OSGOOD-Ansatzes bedingt.

¹ Für die Aluminiumlegierung wurden die statischen Werkstoffkennwerte aus [BUXB95] übernommen.

In den Abbildungen Abb. 17 bis Abb. 24 sind die zügigen und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verläufe sowie die Dehnungswöhlerlinien für beide Werkstoffe, jeweils getrennt nach Halbzeug, dargestellt. Abb. 20 zeigt die Grenzen des MANSON-COFFIN-Ansatzes und führt zur Fragestellung, inwieweit ein solcher Ansatz zur Beschreibung der Dehnungswöhlerlinie geeignet ist und ob eine derartige Beschreibung - hier konkret für AlCuMg2 (Halbzeug Rundmaterial) - hinsichtlich einer rechnerischen Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Konzept noch sinnvoll erscheint.

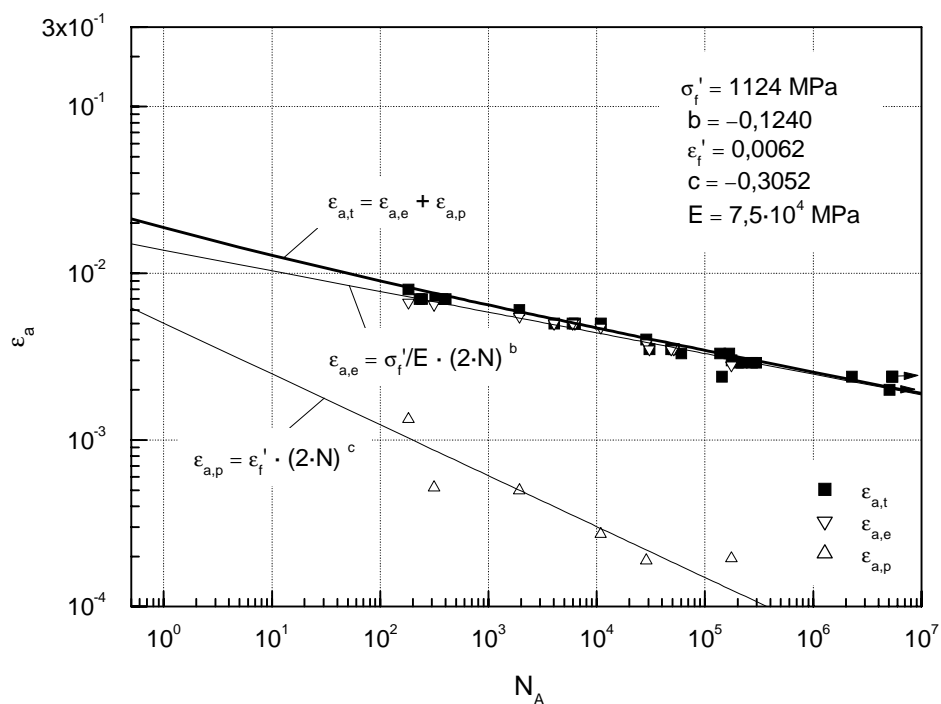


Abb. 20 Anrißdehnungswöhlerlinie AlCuMg2 rund

4.5.2 Zeitabhängiges Werkstoffverhalten

Das Wechselverformungsverhalten beschreibt die Werkstoffreaktion auf eine zyklische Belastung. Bei Auftragung einer im Versuch nicht kontrollierten Beanspruchungsgröße ($\epsilon_{a,p}$ oder σ_a beim totaldehnungskontrollierten Versuch) über der Schwingspielzahl ergibt sich die Wechselverformungskurve. Aus ihr läßt sich das Vorhandensein von Entfestigungs- und Verfesti-

gungsvorgängen im Werkstoff erkennen. Versuche mit von Null verschiedenen Mittellasten haben im Werkstoff die Ausbildung von Mittelspannungen zur Folge. Die Darstellung der Mittelspannung über der Schwingspielzahl läßt je nach Größe, Häufigkeit und Reihenfolge der Mittellasten das charakteristische Mittelspannungsverhalten (Mittelspannungsrelaxation) des Werkstoffes deutlich werden. Wie schon mit den Incremental-Step-Tests wurde in den Ein- und Mehrstufenversuchen zur Untersuchung des transienten Materialverhaltens neben dem ausgeprägten Verfestigungs- (AlCuMg2) und Entfestigungsverhalten (Metasafe 900) nachgewiesen, daß sich bei dehnungskontrollierter elastisch-plastischer Beanspruchung kein stabilisierter Zustand einstellt. Das bedeutet eine kontinuierliche Veränderung der örtlichen Beanspruchung bei konstanter Belastung bzw. eine kontinuierliche Veränderung der Belastung bei konstanter örtlicher Beanspruchung.

- Einstufenversuche (ϵ -gesteuert)

Die σ_m -, σ_a - und $\epsilon_{a,p}$ -Verläufe zeigen, daß außer bei mitteldehnungsfreier Belastung überwiegend von einer Überlagerung der Relaxation mit Ver- und Entfestigung ausgegangen werden muß - σ_m und σ_a ändern sich gleichzeitig, vgl. Abb. 25 bis Abb. 54.

- Mehrstufenversuche (ϵ -gesteuert), Abb. 55 bis Abb. 74

Aus den Versuchen wird deutlich, daß sich bei beiden Werkstoffen während der ersten Schwingspiele nach einem Wechsel des Mitteldehnungsniveaus die Mittelspannung verringert und die Spannungsamplitude erhöht, obwohl Metasafe 900 grundsätzlich entfestigendes Verhalten unterstellt wird. Anschließend bleibt σ_a konstant und nur die Mittelspannung fällt weiter ab. Das bedeutet, einem Abschnitt der Überlagerung von Relaxations- und Verfestigungserscheinungen schließt sich eine reine Relaxationsphase an, vgl. beispielhaft Abb. 63 und Abb. 64.

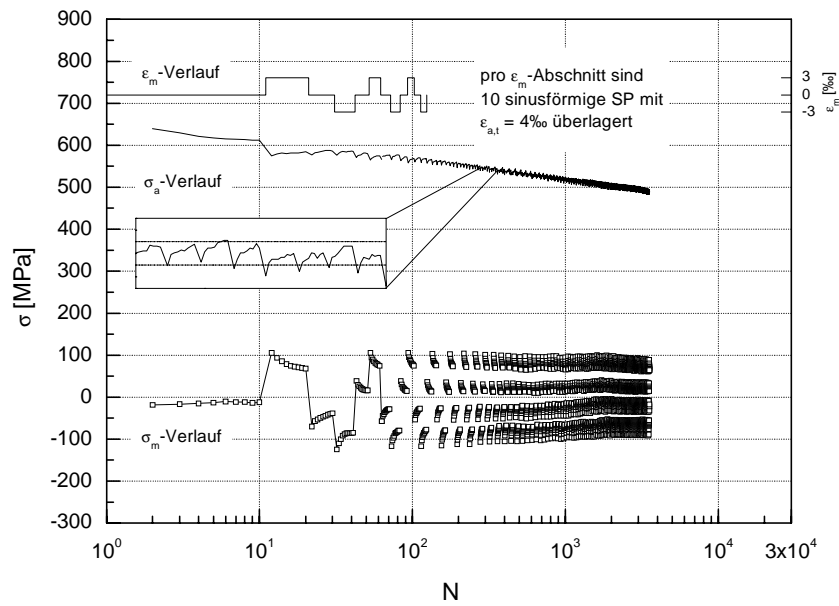


Abb. 63 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach;
Lastfolge lffd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -3; 0; +3\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

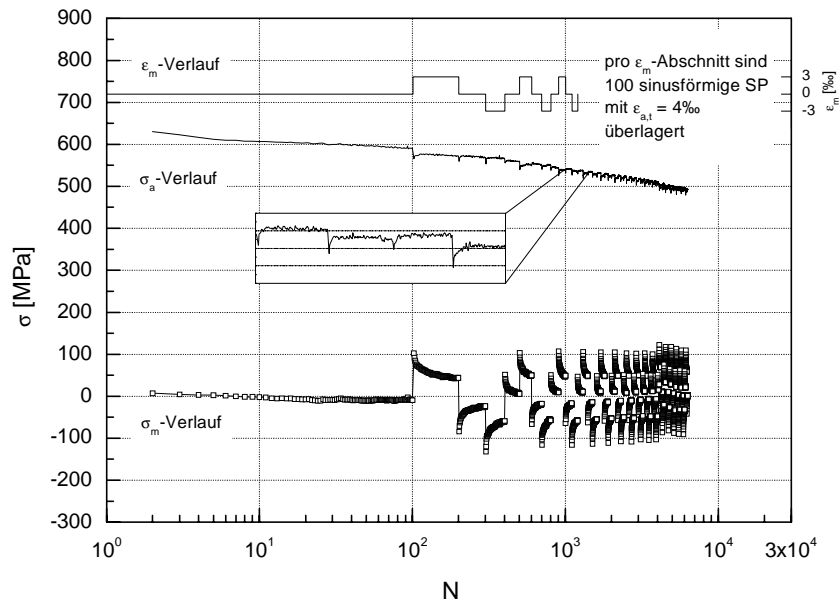


Abb. 64 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach;
Lastfolge lffb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -3; 0; +3\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

Es werden aber auch Mittelspannungserhöhungen beobachtet, vgl. Abb. 66, deren Auftreten nicht zu verallgemeinern ist.

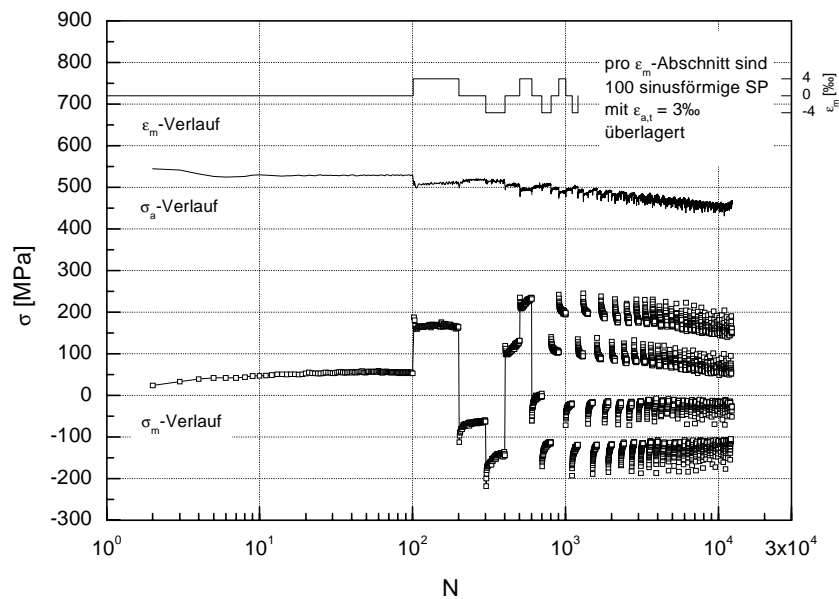


Abb. 66 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach;
Lastfolge lfcb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

Auf die Versuchsdauer bezogen ist auch bei diesen (Mehrstufen-)Versuchen eine Überlagerung von Relaxation und Ver- oder Entfestigung zu erkennen; Ver- bzw. Entfestigung sind jedoch bei weitem nicht so stark ausgeprägt wie bei den Einstufenversuchen. Diese Verhaltensmuster wurden für Verhältnisse der Amplituden der überlagerten Belastungen zur Höhe der Mittellasten von kleiner, gleich oder größer als Eins nachgewiesen und besitzen damit allgemeingültigen Charakter. Bei praxisnahen Belastungen stellt die Länge der Mittellastabschnitte eine stochastische Größe dar, so daß nur die Berücksichtigung von Relaxation und Ver- bzw. Entfestigung bei diesen Werkstoffen zu einer nennenswerten Verbesserung einer Lebensdauervorhersage führen kann, da unterstellt werden muß, daß jeder dieser Vorgänge für sich betrachtet andere Schädigungsabläufe im Werkstoff entstehen läßt als eine Kombination von Relaxation und Ver- bzw. Entfestigung.

Unter den Voraussetzungen, daß sich die Äste der Spannungs-Dehnungs-Hysteresen spiegelsymmetrisch zu einer gedachten Achse durch die Hysteresenumkehrpunkte ausbilden und gleiches Werkstoffverhalten im Zug- und Druckbereich besteht, ist zu bemerken: Ändert sich die

Mittelspannung ($|\sigma_m| \downarrow$) und die Amplituden σ_a bzw. $\epsilon_{a,p}$ bleiben konstant, liegt reine Relaxation vor; ändern sich σ_a bzw. $\epsilon_{a,p}$ und σ_m bleibt konstant, kommt es ausschließlich zu Ver- oder Entfestigung. Ändern sich σ_m und σ_a gleichzeitig, überlagern sich Relaxation und Ver- bzw. Entfestigung. Bei elastisch ertragbaren Dehnungsamplituden kommt es zu keiner Relaxation und keiner Ver- oder Entfestigung. Aus den Ein- und Mehrstufenversuchen lassen sich weitere generelle Aussagen ableiten.

- Unabhängig vom Vorzeichen der Mittelspannung existiert ein qualitativ gleiches Relaxationsverhalten. Es läßt sich kein Anhaltspunkt finden, daß positive Mittelspannungen „schneller relaxieren“ als negative oder umgekehrt.
- Unabhängig vom Vorzeichen der Mittelspannung zeigen auch die Spannungsamplituden als Maß für die Entfestigung und Verfestigung keine Unterschiede in ihren qualitativen Verläufen.

Die Ergebnisse der Mehrstufenversuche beweisen (vgl. Abbildungen auf den folgenden Seiten):

- Bei gleichgroßen Mitteldehnungen und Dehnungsamplituden führen weniger Mitteldehnungswechsel (mehr überlagerte Schwingspiele pro Mitteldehnungsabschnitt bei gleichbleibender Frequenz) generell zu einer Verlängerung der Lebensdauer (Abb. 71 vs. Abb. 72).
- Größere kurz¹ andauernde Mitteldehnungsschwankungen bei gleicher überlagerter Belastung führen nicht zwangsläufig zu einer Verkürzung der Lebensdauer (Abb. 61 vs. Abb. 65). Dagegen kann bei größeren lang² andauernden Mitteldehnungsschwankungen generell von einer Lebensdauerverkürzung ausgegangen werden (Abb. 64 vs. Abb. 68).
- Je Mitteldehnungsniveau wird über die Versuchsdauer betrachtet für AlCuMg2 ein Ansteigen von $|\sigma_m|$ und σ_a beobachtet; bei Metasafe 900 wird σ_a kleiner, für $|\sigma_m|$ ist keine allgemeingültige Aussage möglich.

¹ in den Versuchen 10 überlagerte sinusförmige Schwingspiele

² in den Versuchen 100 überlagerte sinusförmige Schwingspiele

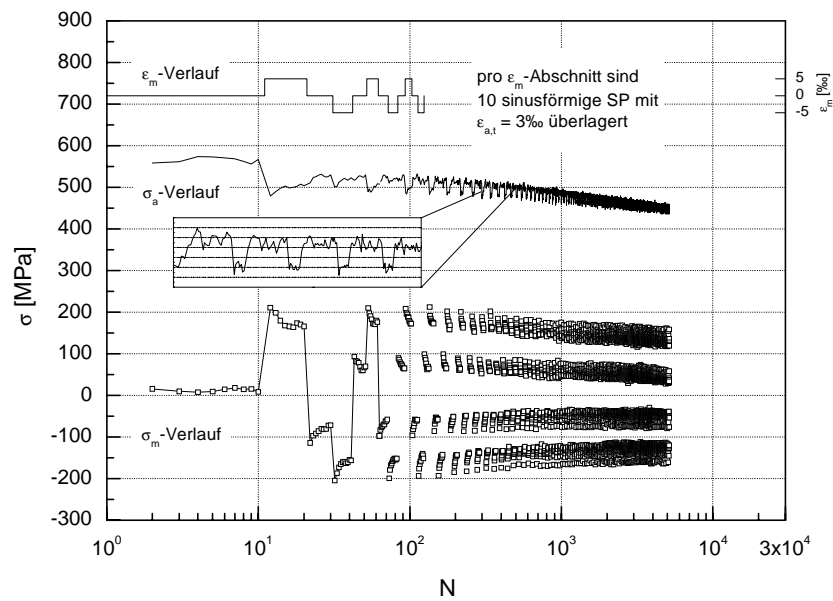


Abb. 71 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach;
Lastfolge lfgd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -5; 0; +5\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

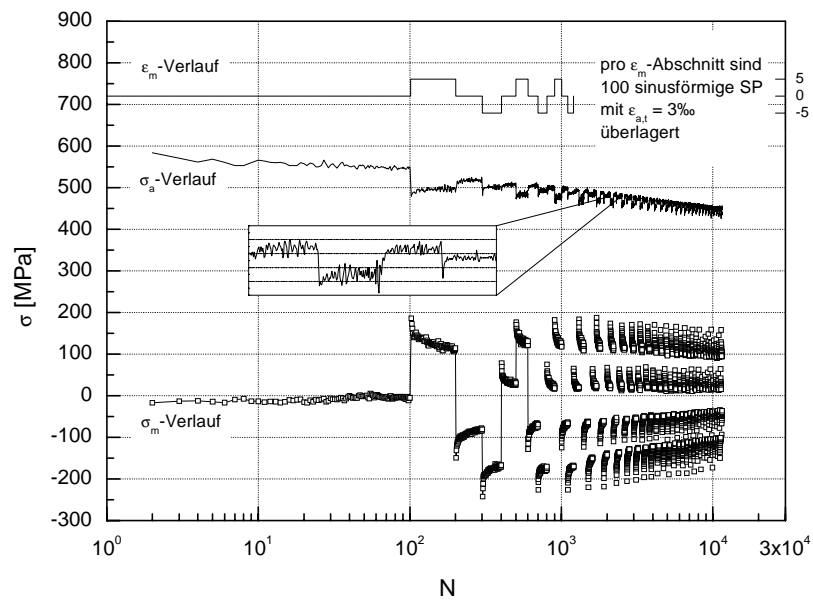


Abb. 72 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach;
Lastfolge lfgb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -5; 0; +5\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

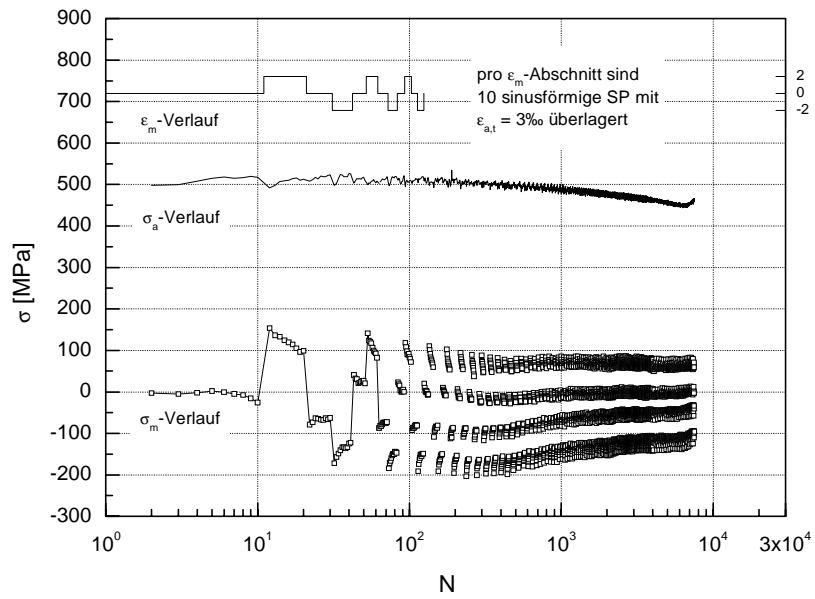


Abb. 61 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach; Lastfolge lfbcd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -2; 0; +2\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

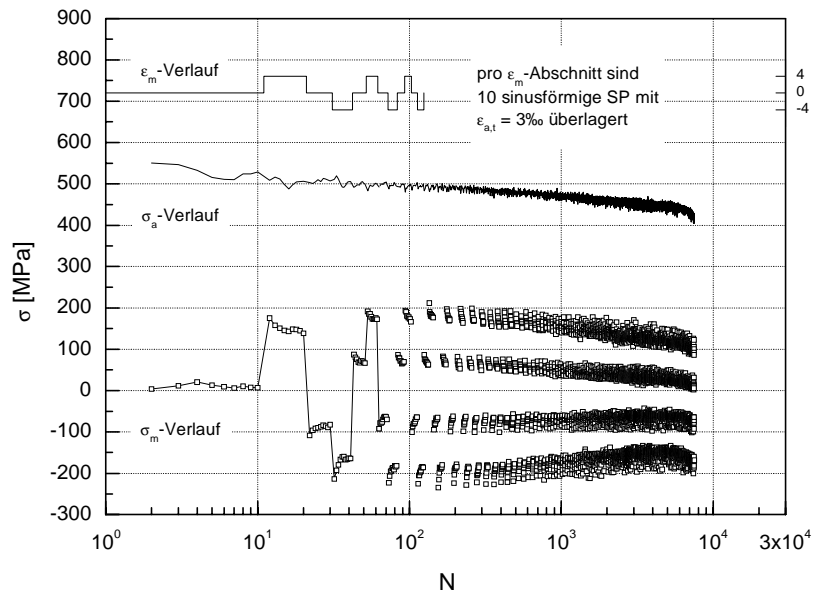


Abb. 65 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach; Lastfolge lfcd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

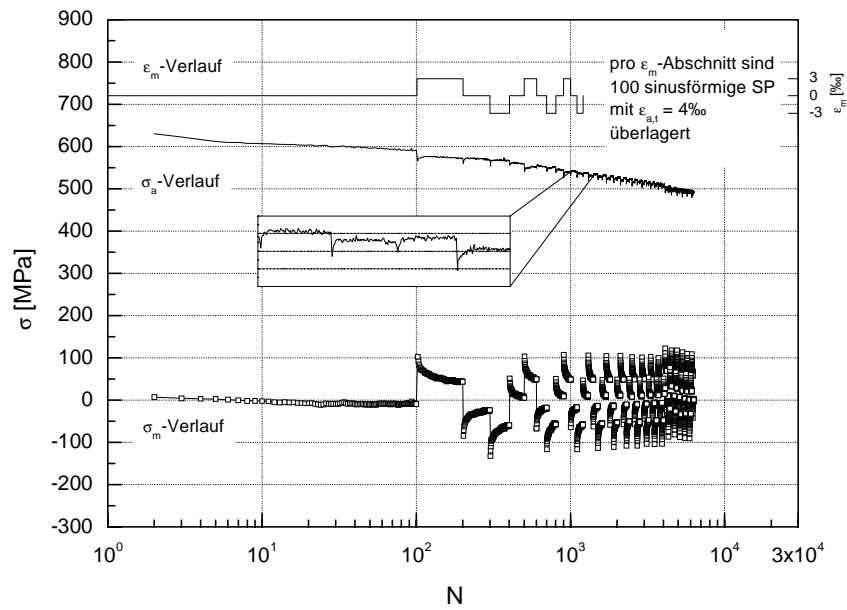


Abb. 64 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach;
Lastfolge lffb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -3; 0; +3\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

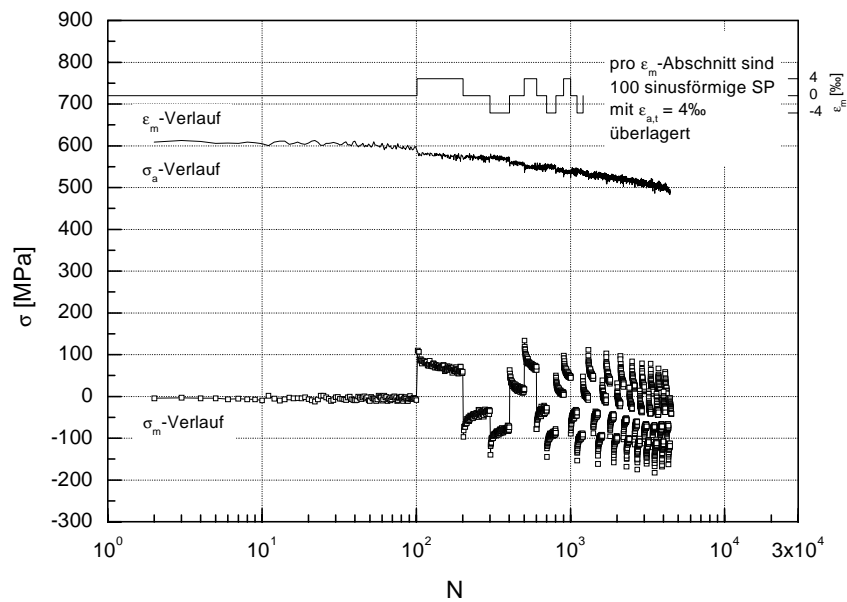


Abb. 68 Mittelspannung, Spannungsamplitude; Metasafe 900 flach;
Lastfolge lfab; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

Aus den dehnungskontrollierten Ein- und Mehrstufenversuchen lassen sich keine charakteristischen Verhaltensmuster der Mittelspannungsrelaxation und Änderung der Spannungsamplituden erkennen und deshalb keine Korrelation zur Versuchslebensdauer finden.

4.5.3 Bauteilwöhlerlinien und Lebensdauerlinien

Die Auswertung der Wöhler- und Lebensdauerversuche erfolgte mit dem Programm „EREG“ [DÖCK92]. Die Versuchsdaten wurden in einem einheitlichen Format zur Verfügung gestellt [EULI94]. Die Grundlage bildeten Daten aus [BUXB95] und die Ergebnisse der neu durchgeführten Untersuchungen. Um die Versuchsreihen, die horizontweise bzw. als „Perlenschnur“ durchgeführt wurden, in gleicher Weise auszuwerten, wurde die Regression über alle Einzelversuche ausgeführt. Als Kriterium wurde das Fehlerquadratminimum in Lebensdauerrichtung verwendet, da N die Zufallsgröße darstellt. Bedingt durch die geringe Anzahl von Versuchswerten im Dauerfestigkeitsbereich der Wöhlerlinien wurden die Dauerfestigkeitsamplituden anhand der aufgetretenen Durchläufer abgeschätzt.

Im Ergebnis der statistischen Auswertung der Wöhler- und Lebensdauerversuche liegen für sämtliche gekerbten Proben die Nennspannungswöhlerlinien und Lebensdauerlinien für alle CARLOS-Folgen sowie für die Lastfolgen LF1-1, LF1-0 und LF3 (Formzahl $K_t = 3,6$), in der Regel für Anriß und Bruch, für $P_0 = 50\%$ vor, siehe Abb. 75 bis Abb. 128. Die beschreibenden Kennwerte sind in den Tab. 12 bis Tab. 15 zusammengestellt. Die Lebensdauerlinien und Kennwerte für die Lastfolgen LF-1, LF1-0, LF2, LF3, LF4, LF6 und LF7 für die Formzahlen $K_t = 1,5; 2,2$ und $2,5$ sind [BUXB95] entnommen.

Für die Bauteilproben beider Werkstoffe läßt sich mit einer Regressionsanalyse ein Zusammenhang zwischen den Neigungsexponenten der Wöhlerlinien und den bezogenen Spannungsgefällen nachweisen. Bedingt durch die geringe Datenanzahl ist dieser allerdings nicht signifikant. Für die CARLOS-Lebensdauerlinien gelang der Nachweis eines signifikanten Zusammenhanges zwischen der Neigung als abhängiger Variablen und Formzahl und bezogenem Spannungsgefälle als Unabhängigen.

Werden die vier CARLOS-Lebensdauerlinien für das Ausfallkriterium Bruch gemeinsam für jede Formzahl dargestellt, wird die annähernd gleiche Neigung erkennbar. Diese Tatsache wird später bei der Bestimmung der nachzurechnenden Spannungshorizonte berücksichtigt. Auffallend bei AlCuMg2 ist die mit zunehmender Kerbschärfe dominierende Parallelität und damit eine Überdeckung von lastfolgebedingten Reihenfolgeeffekten. Eine ausführliche Darstellung für alle Formzahlen wird in der Abb. 129 gegeben.

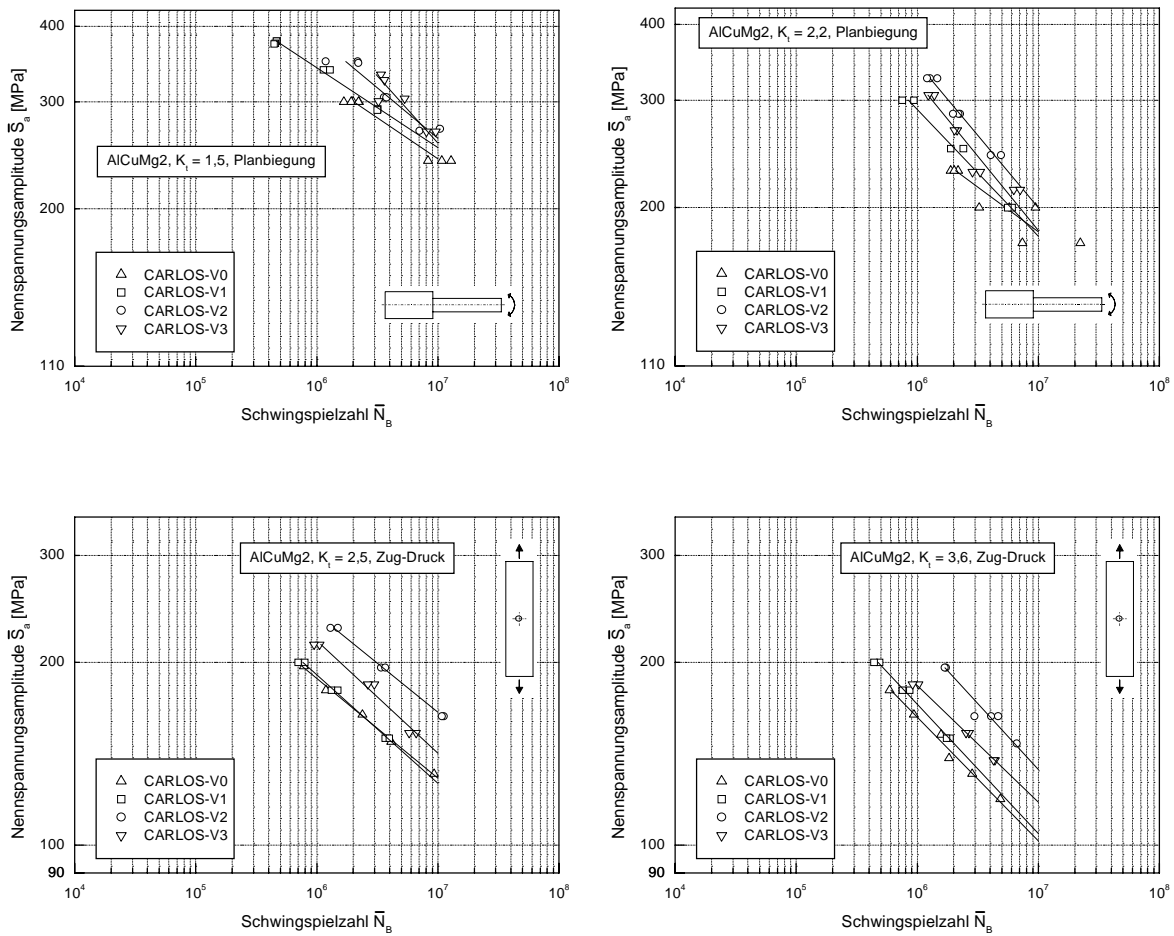


Abb. 129 (Teil 1) CARLOS-Lebensdauerlinien je Formzahl, AlCuMg2, Metasafe 900

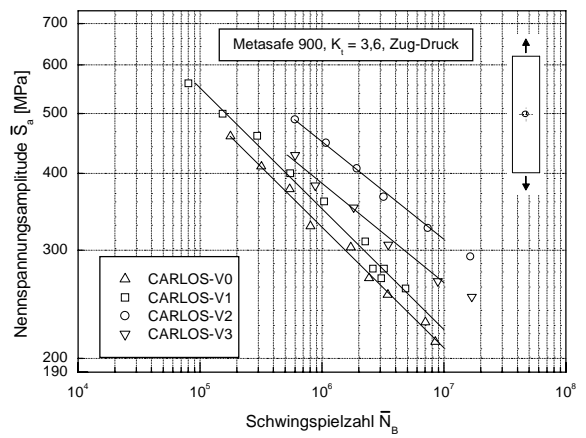
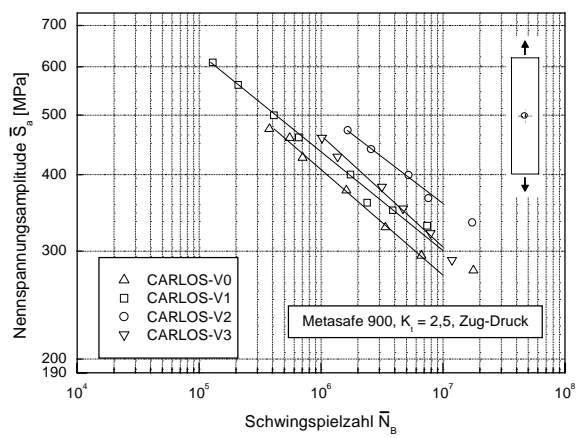
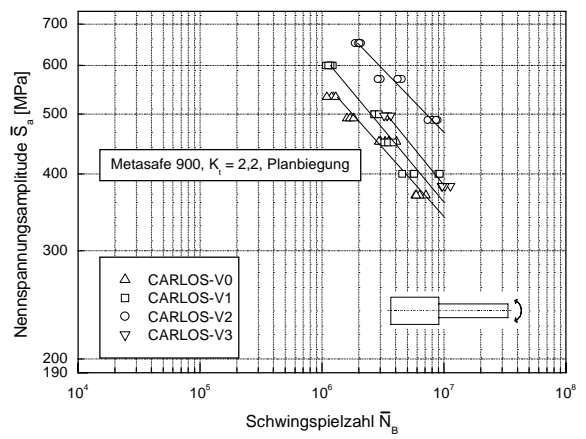
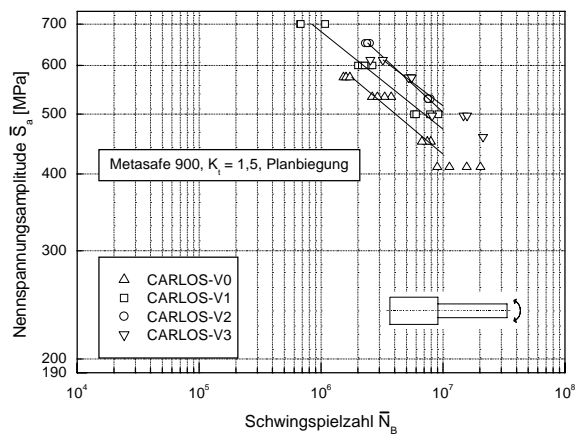


Abb. 129 (Teil 2) CARLOS-Lebensdauerlinien je Formzahl, AlCuMg2, Metasafe 900

5 Theoretische Abschätzung der Lebensdauer

5.1 Die Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung

Zur Bewertung einer Lebensdauervorhersagemethode wird die Schädigungssumme D herangezogen.

$$D = \frac{\overline{N}_{\text{Versuch}}}{\overline{N}_{\text{Rechnung}}} = \frac{\overline{N}_V}{\overline{N}_R} \quad (13)$$

Mit Gleichung (13) wird für jeden gerechneten Horizont die Schädigungssumme bestimmt. Die statistische Auswertung dieser Werte erfolgt mit Hilfe der ROSSOW-Schätzformel (1) für Vertrauenswahrscheinlichkeiten P_i im Wahrscheinlichkeitsnetz. Nach einer linearen Regression können der Mittelwert der Schädigungssumme $D_{50\%}$, die Schädigungssummen bei 10% und 90% Vertrauenswahrscheinlichkeit und damit auch die Streuspanne T_D der Schädigungssumme bestimmt werden, Gleichung (14).

$$T_D = \frac{D_{10\%}}{D_{90\%}} \quad (14)$$

Die Einschätzung einer Vorhersagemethode über den Mittelwert der Schädigungssumme ist nicht sinnvoll, da dieser mit einem Korrekturfaktor in der Rechnung berücksichtigt werden kann. Allerdings können bei Verwendung eines solchen Faktors für Untergruppen (z.B. Trennung nach Werkstoffen, Belastungsarten) wiederum systematische Fehler entstehen. Geeigneter ist die Einschätzung der Güte einer Lebensdauerabschätzung über die Streuspanne der Schädigungssummen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß bereits den experimentellen Daten eine Streuspanne von $2 \leq T_D \leq 3,5$ unterstellt werden muß [EULI99-1], auch wenn in jedem Fall mit der Schadensakkumulationshypothese der Idealwert der Schädigungssumme von „Eins“ erreicht wird.

5.2 Die multiple Regressionsanalyse

Zur Beschreibung linearer Zusammenhänge gemäß Gleichung (15) zwischen einer abhängigen Größe Y und mehreren unabhängigen Größen x_k kann die multiple Regressionsanalyse verwendet werden. Ausführliche theoretische Abhandlungen finden sich u.a. in [SACH74] und [BROS95]. Innerhalb dieser Arbeit wurde diese Form der Regression benutzt, um Abhängigkeiten zwischen Neigungsexponenten und Schädigungssummen - als Abhängigen - und bauteil-, werkstoff- sowie belastungsbeschreibenden Kenngrößen - als Unabhängigen - zu erkennen.

$$Y^* = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_i \cdot x_i + \dots + b_k \cdot x_k \quad (15)$$

Ziel ist es, die Koeffizienten b so zu bestimmen, daß die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen der berechneten Größe Y^* und der beobachteten Größe Y minimal wird. Zu beachten ist, daß die Größen x_k untereinander linear unabhängig sein müssen (Kollinearitätsprüfung). Für die Betrachtung von n unabhängigen Größen x_k müssen mindestens $n+2$ Beobachtungen vorliegen. Ein Maß für die Abhängigkeit der Zielgröße Y von den Einflußgrößen x_k ist der multiple Korrelationskoeffizient R . In der Praxis hat sich als Maß für die Güte der Anpassung durch die Regressionsgleichung das Bestimmtheitsmaß R^2 durchgesetzt. Es ist der quadrierte multiple Korrelationskoeffizient. Zusätzlich dient das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{kor} als Schutz davor, durch eine beliebige Erhöhung der Anzahl der unabhängigen Variablen die Anpassung zu verbessern. Stimmen R^2 und R^2_{kor} in ihrer Größenordnung überein, besteht ein gutes Verhältnis von Variablenanzahl und Anzahl der Beobachtungen. Wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß sich der berechnete R^2 -Wert für die Stichprobe auch dann ergibt, wenn in der Grundgesamtheit kein Zusammenhang zwischen den untersuchten Variable besteht, wird über den F-Wert, Gleichung (16), ermittelt. Ein großer F-Wert und eine sehr kleine Wahrscheinlichkeit bedeuten (üblich $< 0,05$ bzw. $< 5\%$): Besteht in der Grundgesamtheit kein Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen, wird der berechnete R^2 -Wert nur mit der angegebenen (geringen) Wahrscheinlichkeit für die Stichprobe ausgegeben. Eine geringe Wahrscheinlichkeit bedeutet eine hohe Signifikanz von R^2 oder eine hohe Absicherung gegen Null und damit das Vorhandensein einer Abhängigkeit der

untersuchten Variablen. Für gegebene Freiheitsgrade ist die Form der F-Verteilung bekannt. Damit läßt sich die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der sich der F-Wert einstellt.

$$F = \frac{\frac{\text{Quadratsumme der Regression}}{k - 1}}{\frac{\text{Quadratsumme der Residuen}}{N - k}} \quad (16)$$

k .. Anzahl der abhängigen und unabhängigen Variablen

N .. Anzahl der Beobachtungen

k-1 .. Freiheitsgrad ν_1

N-k .. Freiheitsgrad ν_2

Die Quadratsumme der Regression ist der erklärte Teil der Streuung der abhängigen Variablen (zugrunde liegen die Abstände der sich aufgrund der Regressionsgleichung ergebenden Werte für die abhängige Variable vom Mittelwert dieser Variablen). Die Quadratsumme der Residuen ist der Teil der Streuung der abhängigen Variablen, der durch die Regressionsgleichung nicht erklärt wird.

Die Güte des geschätzten Regressionskoeffizienten läßt sich über seinen t-Wert abschätzen, der sich aus der Division des Regressionskoeffizienten mit seinem Standardfehler ergibt. Der Standardfehler ist ein Maß für die Streuung des Stichprobenmittelwertes (Koeffizient) um den Mittelwert (Koeffizient) der Grundgesamtheit. Für einen gegebenen Freiheitsgrad (= Anzahl der Beobachtungen - Anzahl der unabhängigen Größen) ist die Form der t-Verteilung bekannt. Damit läßt sich die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der sich der t-Wert einstellt. Eine geringe Wahrscheinlichkeit P (üblich $< 0,05$) bedeutet eine hohe Signifikanz des Koeffizienten, d.h. der unterstellte Zusammenhang zwischen der zum Koeffizienten gehörenden abhängigen Variable und der unabhängigen Variable gilt mit einer Wahrscheinlichkeit $1-P$ auch für die Grundgesamtheit, der die Stichprobe entstammt.

5.3 Datenbasis zur Nachrechnung experimenteller Lebensdauerwerte

Zur Überprüfung eines möglichen Zusammenhanges zwischen dem Neigungsexponent \bar{k} und den bauteilbeschreibenden Größen Formzahl K_t und bezogenes Spannungsgefälle χ^* bei den CARLOS-Lebensdauerlinien wurden multiple Regressionsanalysen durchgeführt. Der aus der linearen Regression aller Einzelversuche bestimmte Neigungsexponent für jede CARLOS-Lebensdauerlinie, vgl. Tab. 13 und Tab. 15, wird als abhängige Variable definiert. K_t und χ^* sind die unabhängigen Variablen beim Kriterium Bruch. Für das Kriterium Anriß wird als weitere Unabhängige der Neigungsexponent der 50%-Bruchlebensdauerlinie (ebenfalls durch lineare Regression aller Einzelversuche bestimmt) eingeführt. Zwischen den unabhängigen Variablen besteht nachweislich keine mathematische lineare Abhängigkeit (Kollinearitätsprüfung). Mit den Regressionsanalysen wurden die Zusammenhänge (17) für Metasafe 900 (Anriß und Bruch) und AlCuMg2 (Bruch) statistisch nachgewiesen.

für das Ausfallkriterium Anriß

$$\bar{k} = b_0 + b_1 \cdot K_t + b_2 \cdot \chi^* + b_3 \cdot \bar{k}_{\text{Bruch } (P_0=50\%)} \quad (17)$$

für das Ausfallkriterium Bruch

$$\bar{k} = b_0 + b_1 \cdot K_t + b_2 \cdot \chi^*$$

Für AlCuMg2, Ausfallkriterium Anriß, wurden die für die Formzahlen 2,2; 2,5 und 3,6 aus allen CARLOS-Lebensdauerlinien arithmetisch gemittelten Neigungsexponenten für die Rechnungen verwendet, da für $K_t = 1,5$ keine Daten für die multiple Regression zur Verfügung standen. Eine Übersicht der Regressionsstatistik sowie der Neigungsexponenten für die Nachrechnung geben Tab. 16 und Tab. 17.

Die Lebensdauerversuche wurden als „Horizont- und Perlenschnurversuche“ durchgeführt. Die Nachrechnung experimenteller Lebensdauerwerte wird für vier (Zug-Druck) bzw. drei (Biegung) Punkte je CARLOS-Lebensdauerlinie durchgeführt. Der erste Punkt ist der Schwerpunkt der Versuche. Für die anderen Punkte wurden Schwingenspielzahlen festgelegt, die hinreichend durch Versuche abgedeckt sind, vgl. Tabelle 4 und Abb. 130.

Schwingspielzahl	AlCuMg2	Metasafe 900	Formzahl
N ₁	600.000	300.000	2,5; 3,6
N ₂	1.000.000	2.000.000	1,5; 2,2; 2,5; 3,6
N ₃	8.000.000	10.000.000	1,5; 2,2; 2,5; 3,6
N ₄	Versuchsschwerpunkt		1,5; 2,2; 2,5; 3,6

Tabelle 4 Schwingspielzahlen zur Bestimmung nachzurechnender Horizonte (CARLOS)

Mit dem aus der multiplen Regression bestimmten Neigungsexponenten, dem Versuchsschwerpunkt und der vorgegebenen Schwingspielzahl werden die nachzurechnenden Spannungshorizonte für jede CARLOS-Variante mit Gleichung (6) bestimmt. Die Spannungshorizonte werden für das Ausfallkriterium Anriß übernommen.

Für die Lastfolgen LF-1, LF1-0, LF2, LF3, LF4, LF6 und LF7 wurden zur Nachrechnung für beide Ausfallkriterien jeweils die Spannung des obersten und untersten Versuchshorizontes sowie des Versuchsschwerpunktes gewählt. Für die Berechnung der entsprechenden Versuchsschwingspielzahl \bar{N}_v nach Gleichung (6) bilden die aus der Regression der Einzelversuchsergebnisse bestimmten Lebensdauerlinien die Grundlage [BUXB95].

Alle für die Nachrechnung vorgesehenen Werte sind in den Tab. 18 bis Tab. 39 für Bruch (Nennspannungskonzept) und in den Tab. 43 bis Tab. 64 für Anriß (Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose), Spalte „Versuch“ enthalten.

5.4 Die Anwendung des Nennspannungskonzeptes

Für die Durchführung der Lebensdauerrechnungen nach dem Nennspannungskonzept wurde das Programm „LEKOL“ [KOTT89] verwendet. Zum Vergleich mit Ergebnissen aus [BUXB95] erfolgten zunächst Lebensdauerrechnungen für die Lastfolgegruppen CARLOS-V0 bis V3 und LF1 bis LF7, wobei eine Unterteilung nach Werkstoffen vorgenommen wurde. Um einen ersten Überblick der Schädigungssummencharakteristik zu erhalten, wurden verschiedene Varianten der Schadensakkumulation und Mittelspannungsbewertung untersucht.

5.4.1 Mittelspannungsbewertung und Schadensakkumulation

Die Mittelspannung wurde mit drei Varianten des HAIGH-Schaubildes bewertet, wobei für den Druckmittelspannungsbereich generell ein gemittelter Anstieg verwendet wurde, vgl. dazu Abb. 131.

Variante 1: in Anlehnung an [HÄNE94] (FKM-Richtlinie)

Variante 2: für Zugmittelspannungen und $R > 0$ wird $M/2$ angenommen [SONS94]

Variante 3: wie Variante 2, aber Spiegelung um die Prozeßmittelspannung

Die Konstruktion des HAIGH-Schaubildes erfolgte einmal aus zwei Wöhlerlinien ($R = -1$ und $R = 0$) und zum anderen aus der Wöhlerlinie für $R = -1$ und einer geschätzten Mittelspannungsempfindlichkeit M . Für Stahlwerkstoffe wurde diese mit Gleichung (18) nach [HÜCK81] bestimmt, für Aluminium mit Gleichung (19) nach [EULI79].

$$M = 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot R_m - 0,1 \quad (18)$$

$$M = 1,205 \cdot 10^{-6} \cdot R_m^2 + 5,19 \cdot 10^{-5} \cdot R_m + 0,116 \quad (19)$$

Für die Schadensakkumulation wurden die Modifikationen elementar, modifiziert nach HAIBACH und konsequent der als originalen MINER-Regel bekannten Hypothese ausgewählt.

Nach Einschätzung der für die Lastfolgen CARLOS-V0 bis V3 erhaltenen Verteilungen¹ der Schädigungssummen für verschiedene Kombinationen der Verfahren zur Mittelspannungsbewertung und Schadensakkumulation wurden die weiteren Untersuchungen zu Abhängigkeiten zwischen der Schädigungssumme und Kenngrößen aus Bauteil, Werkstoff und Belastung auf folgende Rechnungseinstellungen beschränkt: HAIGH-Schaubild nach Variante 1, konstruiert aus zwei Wöhlerlinien sowie einer Wöhlerlinie mit geschätzter Mittelspannungsempfindlichkeit, Schadensakkumulation nach MINER modifiziert. Die Verteilung der Schädigungssum-

¹ Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in der Arbeit nur die Verteilungen für die im weiteren betrachteten Kombinationen angegeben.

men für diese Randbedingungen sind in den Abb. 132 und Abb. 133 dargestellt. Zwei Beispiele zeigt Abbildung 6. Bei Metasafe 900 ist in der Verteilung der Schädigungssummen eine Unstetigkeitsstelle zu erkennen. Den größeren Schädigungssummen (rechts der Unstetigkeit) läßt sich Biegebelastung ($K_t = 1,5$ und $2,2$) zuordnen, den kleineren Schädigungssummen Zug-Druck-Belastung. Deshalb ist oftmals eine nach geeigneten Untergruppen getrennte statistische Auswertung der Schädigungssummen sinnvoll.

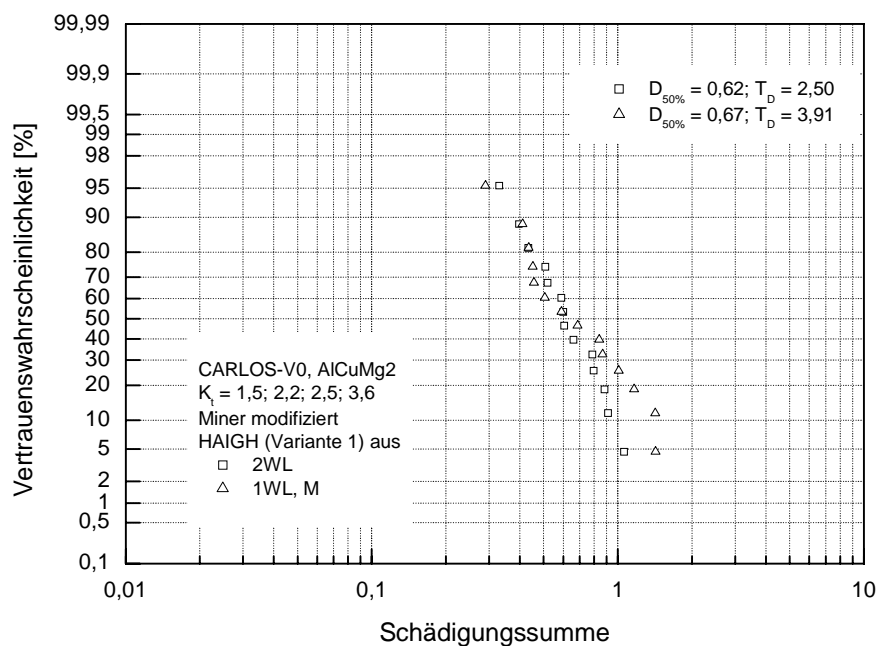


Abbildung 6 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, Lastfolge CARLOS-V0, AlCuMg2 (Teil 1)

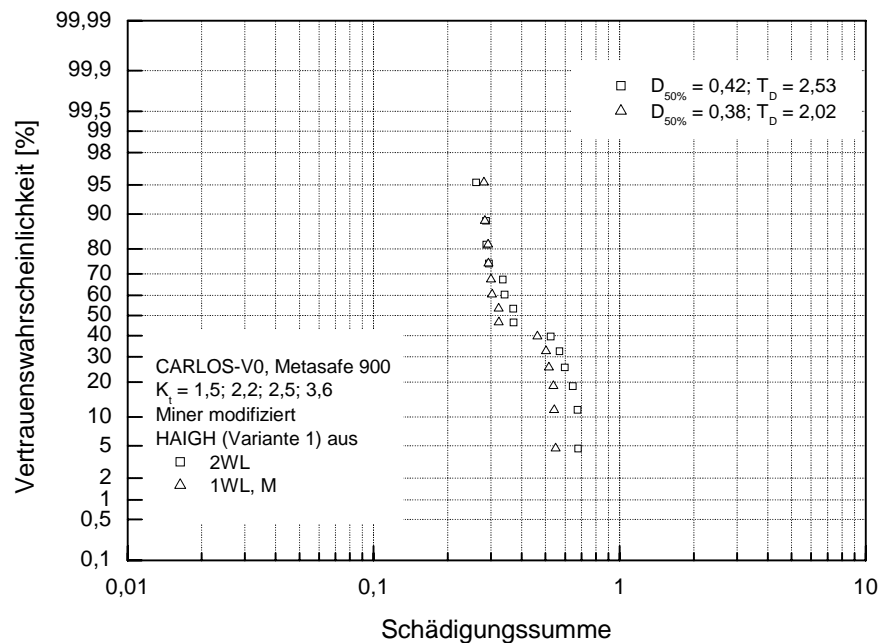


Abbildung 6 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, Lastfolge CARLOS-V0, Metasafe 900 (Teil 2)

5.4.2 Ein Vorschlag zur Verbesserung der Treffsicherheit mit dem Nennspannungskonzept

Getrennt für jede CARLOS-Lastfolge aufgetragen weisen die Verteilungen der Schädigungssummen eine Abhängigkeit von Formzahl und bezogenem Spannungsgefälle auf. Erwartungsgemäß unterscheiden sich die Verteilungen auch untereinander, Abb. 132 und Abb. 133. Zur Erklärung der offensichtlichen Wechselwirkungen zwischen Schädigungssumme und Bauteilgeometrie, Werkstoff sowie Belastung bot sich wiederum die multiple Regressionsanalyse an, die folgende Forderungen erfüllen sollte:

1. Grundlage bilden die Lebensdaueruntersuchungen mit den CARLOS-Lastfolgen.
2. Finden **einer** für **beide** Werkstoffe gültigen Beziehung
3. Rechnungseinstellungen: HAIGH-Schaubild Variante 1, konstruiert aus zwei Wöhlerlinien sowie einer Wöhlerlinie mit geschätzter Mittelspannungsempfindlichkeit, Schadensakkumulation nach MINER modifiziert
4. Bauteil, Werkstoff und Belastung sollen mit möglichst wenigen signifikanten Kennwerten beschrieben sein.

Die Korrelation des bezogenen Spannungsgefälles χ^* zum Neigungsexponenten der CARLOS-Lebensdauerlinien wurde bereits dargestellt. Daß das Mittelspannungsverhältnis MV einen geeigneten Kennwert zur Beschreibung von Mittelwertschwankungen darstellen kann, wurde in mehreren Arbeiten nachgewiesen [KOTT87, BUXB95, OPPE97]. Neben diesen beiden Kenngrößen kam als Werkstoffkennwert der in [BUXB95] als statistisch sicher erkannte Quotient aus Zugfestigkeit und Dauerfestigkeitsamplitude (Wöhlerlinie R=-1) $R_m/S_{D(R=-1)}$ hinzu.

MV erwies sich nur für Metasafe 900 als signifikant. Deshalb wurde nach einer Möglichkeit gesucht, das Mittelspannungsverhältnis nicht aus der ursprünglichen Rainflow-Matrix zu berechnen, sondern aus einer Matrix, die Belastungen enthält, welche werkstoffspezifische Reaktionen auslösen. Die Schädigungssumme D spiegelt die zeitabhängige Werkstoffreaktion auf Mittellaständerungen, wie sie in den CARLOS-Lastfolgen enthalten sind, integral wider. In der Rainflow-Matrix sind diese Mittellaständerungen ebenfalls in integraler Form enthalten. Die Idee besteht darin, Mittelspannungsverhältnisse aus Matrizen zu berechnen, die nur Hysteresen aus einem bestimmten Lastverhältnisbereich beinhalten. Dazu ist es notwendig, in der dimensionslosen Rainflow-Matrix die sogenannte Nullklasse festzulegen; die Klasse, in der für die jeweilige Lastfolge der Übergang von Zug- zur Druckbelastung stattfindet. Mit dieser Zuordnung ist für jedes Rainflow-Matrixelement das entsprechende Lastverhältnis bestimmbar. Alle Matrixelemente, die nicht im gewünschten Lastverhältnisbereich i liegen, werden zu Null gesetzt, Abbildung 7. Damit ist eine Matrix erzeugt, die die gleiche Größe besitzt wie die Rainflow-Matrix und aus der das Mittelspannungsverhältnis MV_i berechnet werden kann.

Nach den multiplen Regressionsrechnungen stellten sich lediglich die im HAIGH-Schaubild Abbildung 8 dargestellten Bereiche 1 und 2 (hohe Zugmittelbeanspruchung) und damit MV_1 und MV_2 als geeignet heraus. Dieses Ergebnis ist plausibel, da sich besonders durch Variation der Belastungen im Zugmittelspannungsbereich die Lebensdauer beeinflussen läßt.

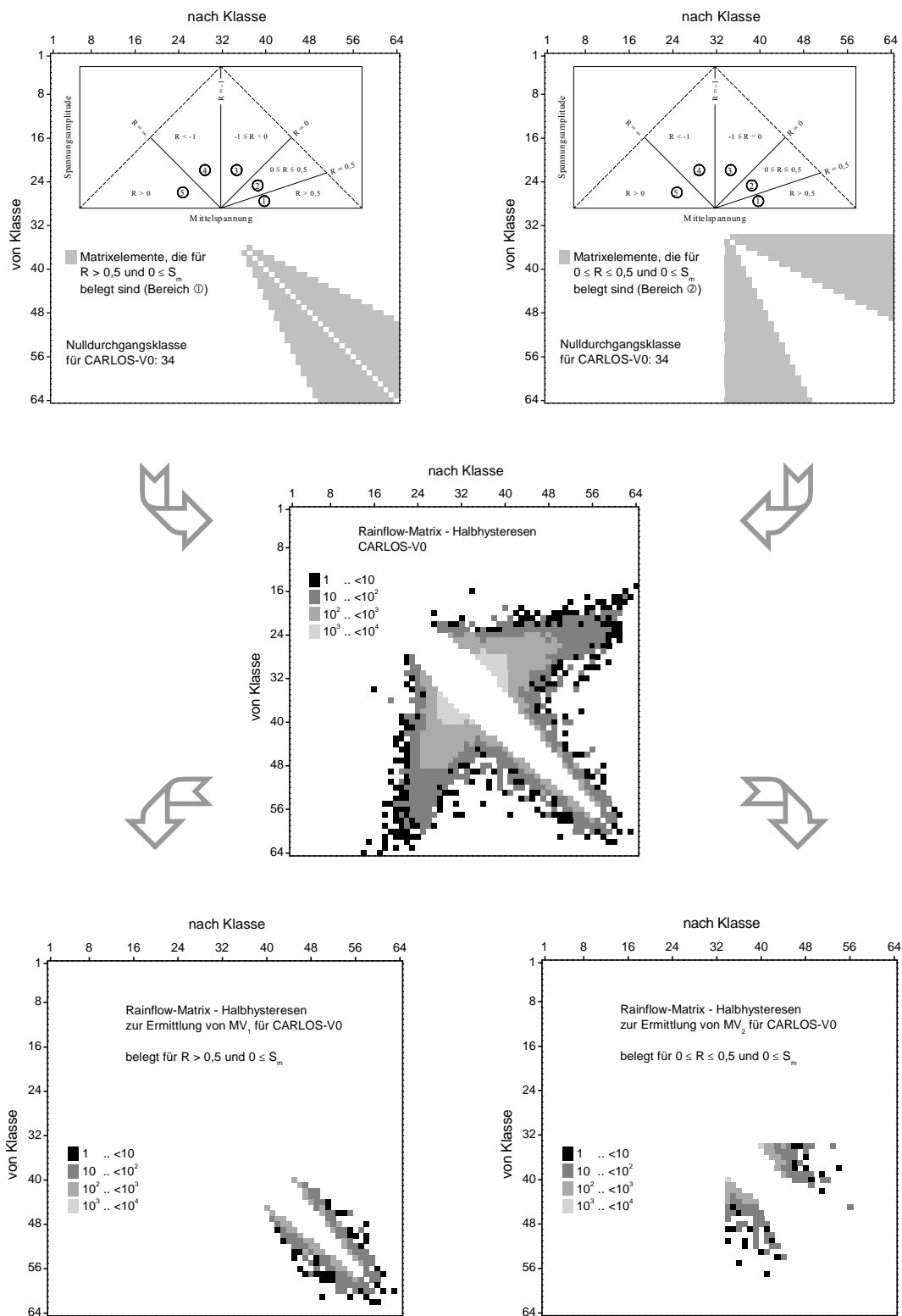


Abbildung 7 Bestimmung der Rainflow-Matrizen in Abhängigkeit vom Lastverhältnis

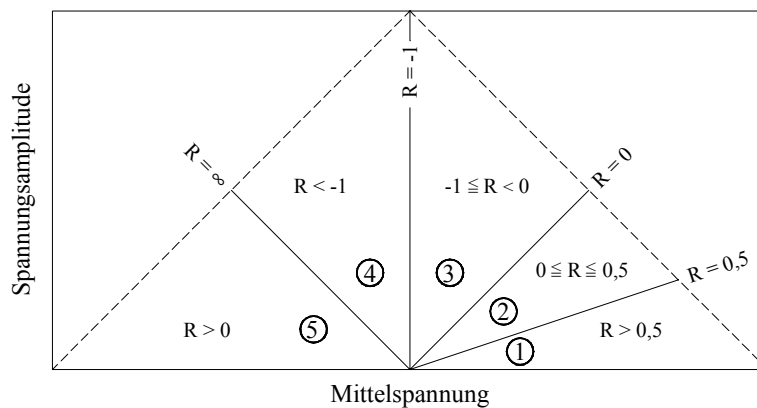


Abbildung 8 HAIGH-Schaubild - Aufteilung in Bereiche

Ein Kennwert, der MV_1 und MV_2 enthält und der für die Lastfolgen LF1 und LF3 Randwerte annimmt, da diese beiden konstruierten Lastfolgen Extremfälle darstellen, wurde mit dem Betrag der Differenz $MV_1 - MV_2$ als Exponent zur Basis e gefunden, vgl. Abb. 134 und Abbildung 9. Eine physikalische Begründung oder Deutung dieser Erkenntnis lässt sich nicht geben. Daß $e^{|MV_1 - MV_2|}$ als Kennwert akzeptabel erscheint, verdeutlichen die Abb. 135 und Abb. 136. Dort sind die logarithmierten Schädigungssummen über $e^{|MV_1 - MV_2|}$ aufgetragen. Ausschließlich über die Werte der CARLOS-Lastfolgen wurde eine lineare Regression durchgeführt und außer der Regressionsgeraden das 90%-Konfidenzintervall angegeben. Mit 90%-iger Wahrscheinlichkeit liegen die $\log(D_{50\%})$ -Werte der Grundgesamtheit innerhalb dieses Bereiches. Alle $\log(D_{50\%})$ -Werte der Lastfolgen LF1 bis LF7 liegen in diesem Band und werden gut durch die Regressionsgerade angenähert. Außerdem zeigt sich auch hier die Randlage der Lastfolgen LF1 und LF3. Der Anstieg der Ausgleichsgeraden sowie die Lage der Punkte besitzen für beide Werkstoffe die gleiche Tendenz. Damit ist zugleich die Werkstoffunabhängigkeit des Kennwertes bestätigt.

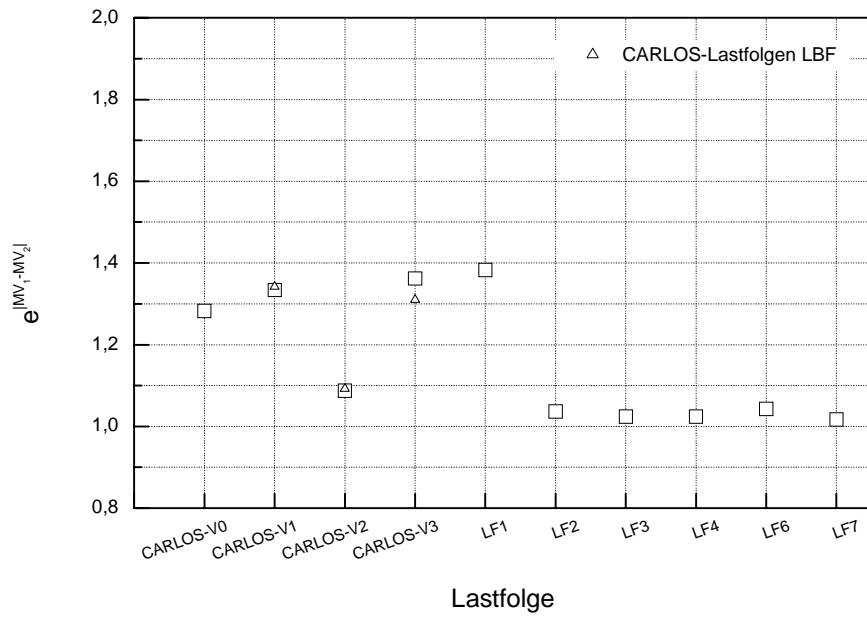


Abbildung 9 Kennwert $e^{|MV_1 - MV_2|}$ in Abhängigkeit von der Lastfolge

Den o. g. Forderungen an die Regressionsanalyse genügt eine Regressionsgleichung mit der logarithmierten Schädigungssumme $\log(D_{50\%})$ als abhängiger Variable und dem bezogenen Spannungsgefälle χ^* , dem Quotient aus Zugfestigkeit und Dauerfestigkeitsamplitude (Wöhlerlinie $R=-1$) $\frac{R_m}{S_{D(R=-1)}}$ und dem Kennwert $e^{|MV_1 - MV_2|}$ als unabhängigen Variablen, Gleichung

(20). Diese Werte erwiesen sich aus einer Vielzahl getesteter als signifikant und für eine allgemeine Beschreibung als geeignet. Die Koeffizienten b_k sind in Tab. 40 dargestellt.

$$\log(D_{50\%}) = b_0 + b_1 \cdot \chi^* + b_2 \cdot \frac{R_m}{S_{D(R=-1)}} + b_3 \cdot e^{|MV_1 - MV_2|} \quad (20)$$

	Unabhängige	Koeffizient		t	P(t)
		b	Standardfehler		
AlCuMg2 $R^2 = 0,5166$ $R^2_{\text{kor}} = 0,4648$ $F = 9,9738$ $P(F) = 0,0001$	Konstante	-1,3785	0,3575	-3,8562	0,0006
	χ^*	-0,2423	0,0859	-2,8222	0,0087
	$R_m / S_{D(R=-1)}$	-0,0707	0,0220	-3,2183	0,0033
	$e^{ MV_1 - MV_2 }$	1,0326	0,2592	3,9837	0,0004
Metasafe 900 $R^2 = 0,6905$ $R^2_{\text{kor}} = 0,6573$ $F = 20,8210$ $P(F) = 2,7067E-07$	Konstante	-1,5536	0,2766	-5,6173	5,1494E-06
	χ^*	-0,3453	0,0666	-5,1834	1,6801E-05
	$R_m / S_{D(R=-1)}$	-0,1312	0,0306	-4,2837	0,0002
	$e^{ MV_1 - MV_2 }$	1,1236	0,1978	5,6800	4,3445E-06

Tab. 40 angepaßte Minersumme - Statistik der Regressionsparameter

Die Anpassung der rechnerischen Lebensdauerwerte, zusammengestellt in den Tab. 18 bis Tab. 39, erfolgt nun nach folgendem Muster: Aus Gleichung (20) wird die Schädigungssumme D_{Regr} bestimmt, mit der entsprechend Gleichung (21) die ursprünglich berechnete Lebensdauer multipliziert und die angepaßte Minersumme D_M berechnet wird, Tab. 41 und Tab. 42.

$$D_M = \frac{D}{D_{\text{Regr}}} = \frac{\bar{N}_V}{\bar{N}_R \cdot D_{\text{Regr}}} \quad (21)$$

Abschließend erfolgt erneut eine statistische Auswertung der Schädigungssummen und Beurteilung der Güte der Lebensdauervorhersage.

Nach der Auswertung ergaben sich die in den Abb. 137 bis Abb. 140 dargestellten Verteilungen der Schädigungssummen. Ein Vergleich mit den Kennwerten der ursprünglichen Lebensdauervorhersage zeigt für die Datensätze eine Verringerung der Streuspanne sowie eine Verschiebung des Mittelwertes in Richtung des theoretischen Wertes „1“, vgl. Abbildung 10, Tabelle 5 und Tabelle 6. Für die Formzahlen 2,2 und 2,5 sind die lastfolgetypischen Schädigungssummen für die Rechnung ohne Anpassung in der Abb. 141 wiedergegeben.

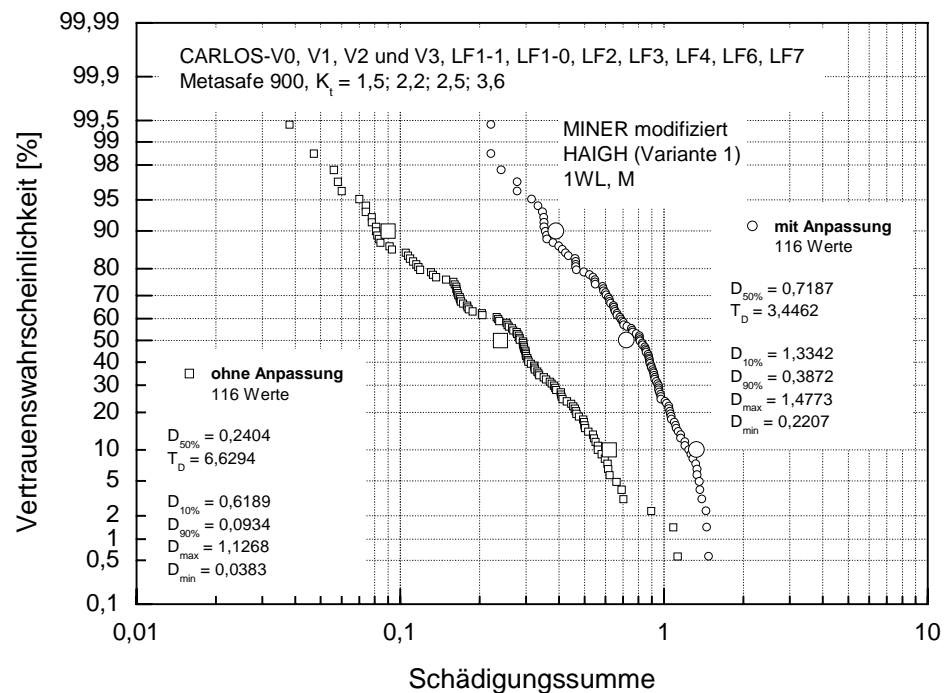
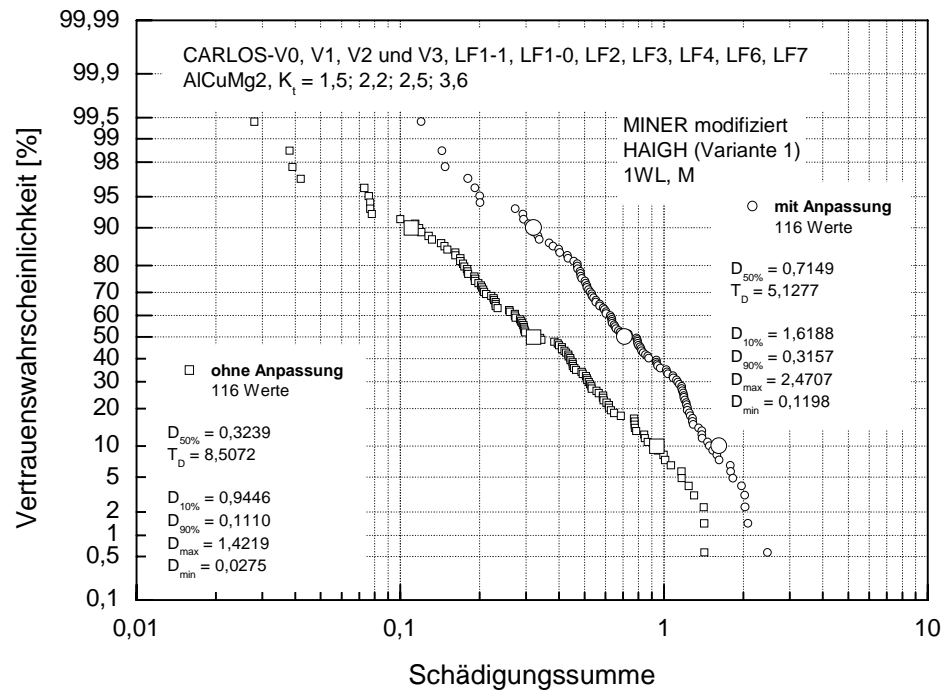


Abbildung 10 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, AICuMg2 und Metasafe 900 ohne und mit Anpassung

Datensatz	AlCuMg2 und Metasafe 900			
	LF1 bis LF7		CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7	
	120 Werte		232 Werte	
	T _D	D _{50%}	T _D	D _{50%}
ohne Anpassung	7,86	0,19	7,70	0,28
mit Anpassung	3,78	0,53	4,00	0,72
Verringerung um	52%	-	48%	-

Tabelle 5 Kennwerte der Lebensdauervorhersage ohne und mit Anpassung, Nennspannungskonzept, Bruch, HAIGH Variante 1, geschätzte Mittelspannungsempfindlichkeit, MINER modifiziert

Datensatz	AlCuMg2				Metasafe 900			
	LF1 bis LF7		CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7		LF1 bis LF7		CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7	
	60 Werte		116 Werte		60 Werte		116 Werte	
	T _D	D _{50%}	T _D	D _{50%}	T _D	D _{50%}	T _D	D _{50%}
ohne Anpassung	8,10	0,21	8,51	0,32	8,64	0,17	6,63	0,24
mit Anpassung	4,31	0,50	5,13	0,71	3,36	0,55	3,44	0,72
Verringerung um	47%	-	40%	-	61%	-	48%	-

Tabelle 6 Kennwerte der Lebensdauervorhersage ohne und mit Anpassung, Nennspannungskonzept, Bruch, HAIGH Variante 1, geschätzte Mittelspannungsempfindlichkeit, MINER modifiziert, nach Werkstoffen getrennt

Der Mittelwert der Schädigungssummen läßt sich über die Konstante b_0 in Gleichung (20) an den Wert „1“ anpassen. Um diese Gleichung allgemeingültig zu halten und vor dem Hintergrund der im Kapitel 5.1 getroffenen Aussagen, wurde diese Anpassung aber nicht vorgenommen.

An dieser Stelle seien zwei Anmerkungen zur Regression gegeben, die die beschriebene Vorgehensweise nicht beeinflussen, jedoch das Anwendungsfeld einschränken:

- Bei der Erzeugung der lastverhältnisabhängigen Matrizen wird eine Lastfolge mit konstanter Mittellast so behandelt wie dieselbe Lastfolge ohne diese Mittellast. Für die Lastfolge LF1-0 gilt demzufolge der gleiche belastungsbeschreibende Kennwert wie für die Lastfolge LF1-1.
- Der Nachteil des Kennwertes $e^{|MV_1 - MV_2|}$ besteht darin, daß Lastfolgen, deren Rainflow-Matrizen in den Bereichen 1 und 2, vgl. Abbildung 8, entweder gar nicht oder so belegt sind, daß $MV_1 = MV_2$ wird, nicht beschrieben werden können und das Verfahren nicht anwendbar ist. Ist nur ein Bereich nicht belegt, wird das zugehörige Mittelspannungsverhältnis per Definition zu Null.

Als Lastfolgekennwerte wurden neben Crestfaktor und Effektivwert der Extremwert-, Amplituden- und Mittelwertverteilungen auch die Völligkeiten der Extremwert- und Amplitudenverteilungen untersucht. In Regressionsrechnungen ließen sich weder die Einzelwerte noch einfache sinnvolle Kombinationen als signifikant für beide Werkstoffe nachweisen. Sie schieden deshalb als beschreibende Kenngrößen aus.

Die Allgemeingültigkeit der Regressionsgleichung (20) sollte unter Beachtung der angeführten Einschränkungen an weiteren Datensätzen (z.B. [EULI99-2]) überprüft werden.

5.5 Die Lebensdauerabschätzung auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen

5.5.1 Örtliches Konzept

Alle Lebensdauerberechnungen nach dem Örtlichen Konzept erfolgten mit einem in [WENZ99] entwickelten Kerbsimulationsprogramm „OELEB“. Zu Vergleichszwecken wurden mit dem am LBF vorhandenen Programm „SoMat“ Lebensdauerrechnungen für ausgewählte Horizonte durchgeführt. Es konnten keine bedeutenden Abweichungen zu den mit dem Kerbsimulationsprogramm „OELEB“ berechneten Ergebnissen festgestellt werden.

Zur Bestimmung des örtlichen Spannungs-Dehnungs-Pfades aus der gegebenen Lastfolge wurde der Hysteresis Counting Method-Algorithmus¹ [CLOR85] verwendet. Für die Mittelspannungs- bzw. Schädigungsbewertung standen im Programm der P_{SWT} -Parameter nach SMITH, WATSON, TOPPER [SMIT70] und der von BERGMANN [BERG83] modifizierte P_{SWTerw} -Parameter, der eine differenzierte Bewertung von Zug- und Druckmittelspannungen erlaubt, zur Verfügung.

$$P_{\text{SWT}} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \cdot \varepsilon_a \cdot E} \quad (22)$$

$$P_{\text{SWTerw}} = \sqrt{(\sigma_a + k \cdot \sigma_m) \cdot \varepsilon_a \cdot E} \quad (23)$$

mit

$$\begin{aligned} k &= 1 \quad \text{für } \sigma_m \geq 0, \\ k &= 0 \quad \text{für } \sigma_m < 0 \text{ (für Stahl),} \\ k &= 0,5 \quad \text{für } \sigma_m < 0 \text{ (für Aluminium)} \end{aligned}$$

Zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen den Nennbelastungen und den örtlichen Beanspruchungen wurde die Kerbgrundbeziehung (24) nach NEUBER [NEUB61] genutzt. Sie stellt eine an scharfen Kerben unter Schubbeanspruchung abgeleitete Näherungsformel dar, besitzt aber erfahrungsgemäß einen breiteren Gültigkeitsbereich [AMST84].

$$\sigma \cdot \varepsilon = K_t^2 \cdot S \cdot e \quad (24)$$

Gleichung (24) beschreibt den allgemeinen Fall für elastische bzw. elastisch-plastisch Nennbelastungen (allgemeine bzw. erweiterte NEUBER-Regel). Für elastische Nennbelastungen läßt sich Gleichung (24) umschreiben und als sogenannte einfache NEUBER-Regel (25) anwenden.

$$\sigma \cdot \varepsilon \cdot E = (K_t \cdot S)^2 \quad (25)$$

¹ Dieser Algorithmus beinhaltet die Vorstellungen über das Werkstoffverhalten (MASING und Memory) und die Hysteresezählung und -klassierung nach der Rainflow-Methode

Die Schädigungsbeiträge der Hysteresen des örtlichen Spannungs-Dehnungs-Pfades wurden mit der originalen MINER-Regel bis zum Wert Eins aufsummiert.

Die Lebensdauerrechnungen für die festgelegten Horizonte, vgl. Tab. 43 bis Tab. 64, wurden unter den folgenden Gesichtspunkten durchgeführt,

1. die Ergebnisse aus [BUXB95] am Datensatz LF1 bis LF7 ohne Ergebnisse der Proben mit $K_t = 3,6$ werkstoffspezifisch zu vergleichen,
2. den Einfluß der Werkstoffkennwerte aus [BUXB95], aus den vorliegenden „neuen“ Untersuchungen und aus dem UML an den Datensätzen CARLOS-V0 bis V3 und LF1 bis LF7 festzustellen und
3. die Wirkung der erweiterten und einfachen NEUBER-Regel bei Biegung und Zug-Druck-Belastung einzuschätzen.

Die in [BUXB95] bestimmten, aber nicht nach Halbzeugen unterschiedenen, und für die Vergleichsrechnungen verwendeten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 7 zusammengefaßt. Die innerhalb dieser Arbeit neu ermittelten und nach Halbzeugen unterschiedenen Kennwerte sind in Tab. 4 und Tab. 5 aufgeführt.

Parameter	AlCuMg2	Metasafe 900
R_m [MPa]	586	842
E [MPa]	76.000	210.000
K' [MPa]	523	1608
n'	0,0072	0,1650
σ'_f [MPa]	1069	1131
b	-0,1167	-0,0783
ϵ'_f	0,0032	0,4403
c	-0,3274	-0,6300
ϵ_D	0,00200	0,00195

Tabelle 7 zyklische Kennwerte AlCuMg2 und Metasafe 900 aus [BUXB95]

Parameter	AlCuMg2			Metasafe 900	
	Flachmaterial	Rundmaterial		Flachmaterial	Rundmaterial
		1. Charge	2. Charge		
R_m [MPa]	490	586	569	870	845
$R_{p0,2}$ [MPa]	310	430	438	616	650
A_5 [%]	16,5	10,8	12,5	17,9	17,7
E [MPa]	75.000	75.000	75.000	200.000	200.000

Tab. 4 statische Kennwerte AlCuMg2 und Metasafe 900

Parameter	AlCuMg2		Metasafe 900	
	Flachmaterial	Rundmaterial 1. und 2. Charge	Flachmaterial	Rundmaterial
$R'_{p0,2}$ [MPa]	420	537	549	547
K' [MPa]	581	656	1204	1219
n'	0,0522	0,0322	0,1264	0,1290
σ'_f [MPa]	1135	1124	982	906
b	-0,1411	-0,1240	-0,0639	-0,0577
ϵ'_f	0,1974	0,0062	0,1995	0,1003
c	-0,5851	-0,3052	-0,5057	-0,4472
ϵ_D	0,00200	0,00200	0,00195	0,00195

Tab. 5 zyklische Kennwerte AlCuMg2 und Metasafe 900

Die Ergebnisse der Auswertung dieser Vergleichsrechnungen zeigen Tabelle 8 und Abb. 142.

Datensatz ohne Formzahl 3,6 Rechnung nach MINER original, NEUBER einfach	AlCuMg2 LF1 bis LF7		Metasafe 900 LF1 bis LF7	
	T_D	$D_{50\%}$	T_D	$D_{50\%}$
Ergebnisse aus [BUXB95] (MINER original, NEUBER einfach, P_{SWT})	5,76	0,38	6,48	1,46
P_{SWT} , Werkstoffparameter aus [BUXB95]	6,32	0,31	6,17	1,48
P_{SWT} , „neue“ Werkstoffparameter	9,25	0,52	6,51	0,96
P_{SWT} , Werkstoffparameter UML	26,97	0,07	5,90	0,66
$P_{SWT_{Terw}}$, Werkstoffparameter aus [BUXB95]	6,29	0,32	6,22	1,50
$P_{SWT_{Terw}}$, „neue“ Werkstoffparameter	9,25	0,53	6,53	0,97
$P_{SWT_{Terw}}$, Werkstoffparameter UML	25,51	0,08	6,00	0,68

Tabelle 8 Einfluß der Werkstoffparameter auf die Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Konzept

Die Streuspannen und Mittelwerte der Schädigungssummen zeigen den Einfluß der Werkstoffparameter bei AlCuMg2. Für Metasafe 900 wird die Bedeutung beim direkten Vergleich der lastfolgeabhängigen Schädigungssummen verständlich, Abbildung 11.

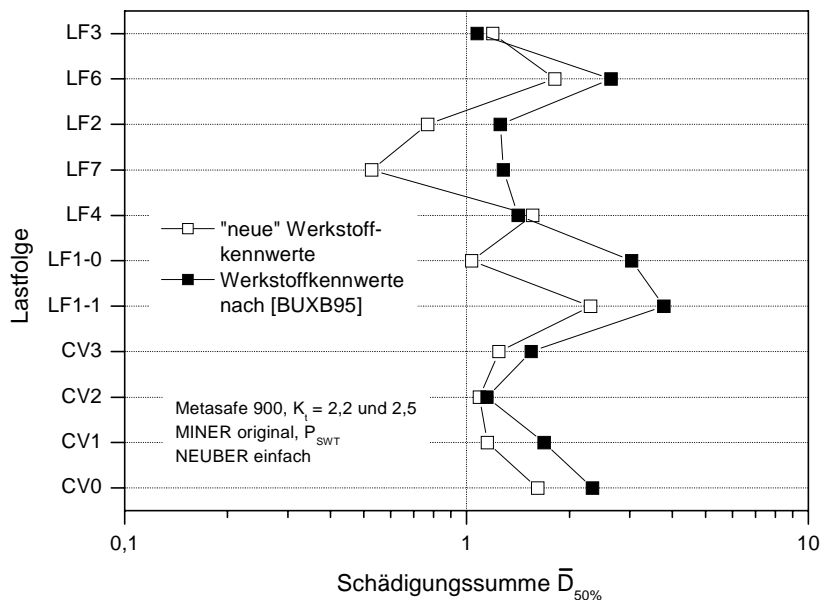


Abbildung 11 lastfolgetypische Schädigungssummen - Einfluß der Werkstoffparameter, Örtliches Konzept, Metasafe 900

Für die CARLOS-Lastfolgen und die Lastfolgen LF1 bis LF7 hat die Wahl des Schädigungsparameters - P_{SWT} oder P_{SWTerw} - bei beiden Werkstoffen keine nennenswerte Auswirkung auf die Statistik der Schädigungssummen. Die Anwendung des UML bei Lebensdauervorhersagen nach dem Örtlichen Konzept für AlCuMg2-Bauteile ist nicht zu empfehlen, vgl. Streuspannen Tabelle 8. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden für die weiteren Rechnungen die innerhalb dieser Arbeit bestimmten „neuen“ Werkstoffkennwerte sowie der P_{SWT} -Parameter benutzt. Den Untersuchungen für die Lastfolgen LF1 bis LF7 hinzugefügt wurden Rechnungen mit dem Datensatz der Lastfolgen CARLOS-V0 bis V3. Die rechnerisch abgeschätzten Lebensdauerwerte sind in den Tab. 43 bis Tab. 64 zusammengefaßt. Die statistische Auswertung der Schädigungssummen ergab die in Tabelle 9 und den Abb. 143 bis Abb. 146 zusammengestellten Ergebnisse.

Datensatz	AlCuMg2				Metasafe 900			
	CARLOS-Lastfolgen		LF1 bis LF7		CARLOS-Lastfolgen		LF1 bis LF7	
	34 Werte		57 Werte		53 Werte		60 Werte	
	T_D	$D_{50\%}$	T_D	$D_{50\%}$	T_D	$D_{50\%}$	T_D	$D_{50\%}$
NEUBER einfach für Biegung und NEUBER erweitert für Zug-Druck	3,36	1,31	11,26	0,63	18,66	1,61	6,83	1,14
NEUBER einfach für Biegung und Zug-Druck	3,37	1,30	11,26	0,63	8,21	1,20	6,13	1,00

Tabelle 9 Kennwerte der Lebensdauervorhersage - Einfluß der NEUBER-Regel, Örtliches Konzept, MINER original, P_{SWT}

Auffallend ist der Unterschied der Streuspannen bei Metasafe 900 für die CARLOS-Lastfolgen. In [HICK99] und [WENZ99] wird bei Biegung die einfache, bei Zug-Druck die erweiterte NEUBER-Regel vorgeschlagen. Entgegen diesen, hier ebenfalls untersuchten Auffassungen führte die Anwendung der einfachen NEUBER-Regel für beide Beanspruchungsarten bei Metasafe 900 zu geringeren Streuspannen der Schädigungssummen. Die Beanspruchung der Flachproben wird mit der erweiterten NEUBER-Regel deutlich überschätzt, vgl. Abb. 145. Eine generelle Anwendung der erweiterten NEUBER-Regel bei Zug-Druck-Beanspruchung mit der Begründung eines Plastizierens des Grundquerschnittes schon bei geringen Spannungsüberhöhungen im Kerbgrund ist deshalb aus dieser Sicht abzulehnen. Für

AlCuMg2 ergaben sich keine nennenswerten Unterschiede. Das ist aber auf die hauptsächlich im elastischen Bereich liegenden Nennbelastungen zurückzuführen.

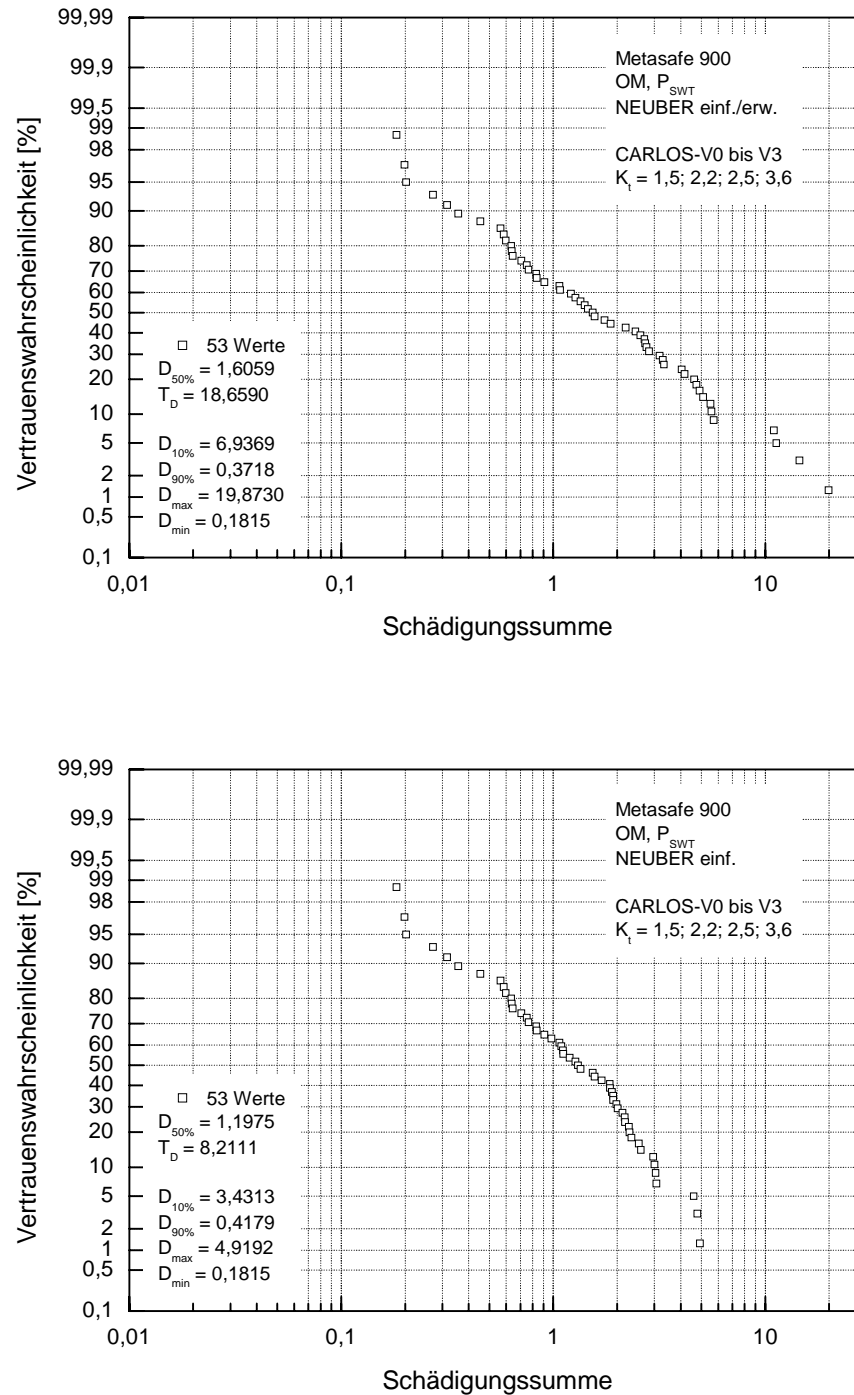


Abb. 145 Verteilung der Schädigungssummen - Einfluß der NEUBER-Regel, Örtliches Konzept, CARLOS-Lastfolgen, Metasafe 900

Dem Einfluß veränderlicher Werkstoffkennwerte - in diesem Fall K' und n' aus der RAMBERG-OSGOOD-Beziehung - auf die Treffsicherheit des Örtlichen Konzeptes wurde ebenfalls nachgegangen. Verwendet wurde ein ebenfalls in [WENZ99] entwickeltes Programm mit einer erweiterten Kerbsimulation. Während bei den konstruierten Lastfolgen LF1 bis LF7 die Berücksichtigung des Entfestigungsverhaltens von Metasafe 900 über linear veränderliche K' und n' während der Kerbsimulation zu einer Verringerung der Streuspanne T_D führte [WENZ99], gelang bei den praxisnahen CARLOS-Lastfolgen keine Verbesserung der Treffsicherheit gegenüber der „einfachen“ Kerbsimulation. Bei einem 42 Werte umfassenden Datensatz stiegen die Streuspanne T_D von 7,7 auf 21,6 und der Mittelwert $D_{50\%}$ von 1,2 auf 6,4, vgl. Abb. 147. Daraus muß gefolgert werden, daß bei Betriebsbelastungen mit diskontinuierlichen Mittellaständerungen eine lineare Beschreibung der Änderung der Werkstoffparameter K' und n' , wie sie in [WENZ99] vorgeschlagen wird, ungenügend ist, oder die Vernachlässigung der Mittelspannungsrelaxation eine Verbesserung der Treffsicherheit nicht zuläßt. Die Lebensdauerabschätzungen bei Berücksichtigung des transienten Materialverhaltens mußten sich auf Metasafe 900 beschränken, da numerische Probleme keine Rechnungen für AlCuMg2 zuließen. Die Ursache liegt vermutlich in den sehr flach verlaufenden zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven im hohen Dehnungsbereich für beide Halbzeuge.

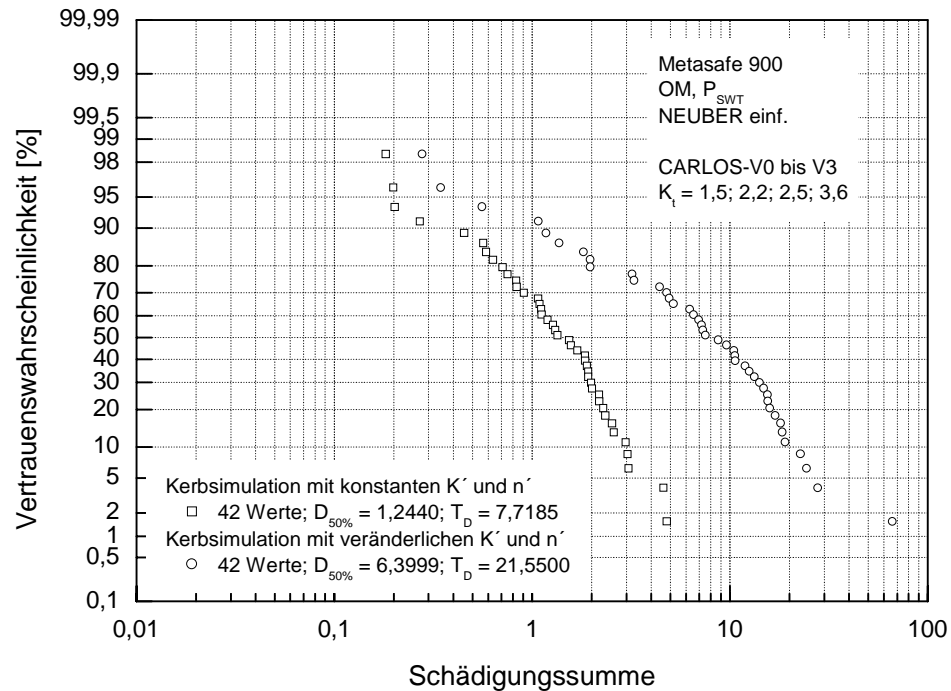


Abb. 147 Kerbsimulation ohne und mit Entfestigung, CARLOS-Lastfolgen, Metasafe 900

5.5.2 Lebensdauerprognose

Die Verwendung integraler Kennwerte auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen ist mit dem Programm „Lebensdauerprognose“ [HICK99] möglich. Nach einer Kerbsimulation wird der örtliche Spannungs-Dehnungs-Pfad klassiert. Dabei werden Rainflow- und Markovmatrix sowie Mittelwert- und Amplitudenänderungsmatrizen Markovscher Art erfaßt. Um auch diese Methode der Lebensdauerabschätzung anzuwenden, wurden zunächst für alle nachzurechnenden Horizonte die experimentellen Lebensdauerwerte anhand der aus den Versuchen abgeschätzten Lebensdauerlinien bestimmt und der Datenbasis des Lebensdauerprognoseprogrammes hinzugefügt. Im nächsten Schritt konnten aus dem Datenbestand, der neben den hier untersuchten Werkstoffen eine Vielzahl weiterer Aluminiumlegierungen und Stähle umfaßt, je eine Prognosegleichung für AlCuMg2 und Metasafe 900 abgeleitet werden. Die darin enthaltenen Kennwerte zur Beschreibung der Beanspruchungshöhe, des Beanspruchungsprozesses und des Bauteiles wurden aus einer multiplen Regressionsanalyse als statistisch sicher

erkannt und weisen einen signifikanten Zusammenhang zur ertragbaren Lebensdauer auf. Sie sind im folgenden kurz erläutert.

Beanspruchungshöhe

Lagemaß zur Beschreibung der Beanspruchungshöhe zwischen Zugfestigkeit und Dauerfestigkeit auf Dehnungsbasis

$\epsilon_{2a,r}$ (nur Metasafe 900) .. Ersatzdehnungsamplitude der Hüllhysterese

Beanspruchungsprozeß

Cr .. Crestfaktor aus der örtlichen Rainflow-Matrix

$\sigma_{LMMoD, Eff}$.. auf σ_a bezogener Effektivwert der Mittelwertänderungsmatrix Markovscher Art mit logarithmischer Wichtung der Häufigkeiten und Ausschluß stationärer Teilprozesse

$\sigma_{LMMoD, a}$.. auf σ_a bezogener Erwartungswert der Verteilung der Nebendiagonale der Mittelwertänderungsmatrix Markovscher Art mit logarithmischer Wichtung der Häufigkeiten und Ausschluß stationärer Teilprozesse

relative SBV (nur AlCuMg2) .. relative Schwingbreitenvölligkeit der örtlichen Rainflow-Matrix

Bauteilstützwirkung

Quotient aus dem Produkt von bezogenem Spannungsgefälle, der wirksamen Bauteilbreite und der elastizitätstheoretischen Formzahl und dem Produkt von Kerbradius und Traglastformzahl

Eine ausführliche Darstellung findet sich in [HICK99]. Die mit den Prognosegleichungen abgeschätzten Lebensdauern sind in den Tab. 43 bis Tab. 64 zusammengestellt. Die Auswertung der Schädigungssummen zeigen die Tabelle 10 und die Abb. 148 und Abb. 149.

Datensatz: CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7	AlCuMg2 91 Werte		Metasafe 900 113 Werte	
	T_D	$D_{50\%}$	T_D	$D_{50\%}$
Örtliches Konzept (Miner original, NEUBER einfach, P_{SWT})	9,0530	0,8247	7,0622	1,0904
Lebensdauerprognose	5,1961	0,6701	6,6317	0,9153

Tabelle 10 Kennwerte der Lebensdauervorhersage - Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose

Um dem vom Prognoseprogramm geforderten Wertebereich der Werkstoffkennwerte zu entsprechen, mußten für AlCuMg2 die aus dem UML geschätzten Werkstoffkennwerte in der Rechnung eingesetzt werden. Außerdem wurde für Metasafe 900 bei Biegung die einfache, bei Zug-Druck-Belastung die erweiterte NEUBER-Regel verwendet, da diese Annahmen auch der bereits vorhandenen Datenbasis zugrundelagen. Beide Annahmen (UML bei AlCuMg2 und erweiterte NEUBER-Regel bei Zug-Druck-Belastung) wurden bei der Untersuchung des Örtlichen Konzeptes bereits als nicht erfolgversprechend für die Verbesserung der Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung eingestuft. Die Ergebnisse mit der Lebensdauerprognose sind deshalb mit dem Blick auf die ungünstigen Randbedingungen zu bewerten.

Mit der Lebensdauerprognose verringert sich die Streuspanne bei AlCuMg2 deutlich, bei Metasafe 900 wenig. Die Mittelwerte verschieben sich allerdings zur unsicheren Seite. In Abbildung 12 sind die lastfolgetypischen Schädigungssummen für die Formzahlen 2,2 und 2,5 für das Örtliche Konzept und die Lebensdauerprognose dargestellt. Als Konsequenz aus den dehnungsgesteuerten Mehrstufenversuchen waren für die Lastfolgen LF3 und LF4 die geringsten Schädigungssummen zu erwarten und für die Lastfolgen LF7, LF2 und LF6 eine Reihung, wie sie mit der Lebensdauerprognose bei Metasafe 900 entsteht. Ausgehend von den aus den dehnungsgesteuerten Mehrstufenversuchen gewonnenen Erkenntnissen müßten sich innerhalb der CARLOS-Lastfolgen die kleinsten Schädigungssummen für die Variante V3, die größten für die Varianten V1 und V2 ergeben. Die Schädigungssummen für die Variante V0 sollten sich zwischen denen der Varianten V2 und V3 bewegen. Daß eine diesen Überlegungen entsprechende Systematik jedoch nicht erkennbar ist - Ausnahme: CARLOS-Lastfolgen bei Anwendung der Lebensdauerprognose -, kann auf zwei Ursachen hindeuten:

- Bei der Ableitung und Generierung der verschiedenen CARLOS-Lastfolgen wurden nicht ausschließlich die Parameter Intensitäts- und Häufigkeitsverhältnis geändert, sondern unbeabsichtigt auch andere das Ermüdungsverhalten beeinflussende Lastfolgecharakteristika.
- Die Annahme einer Übertragbarkeit der an Werkstoffproben mit deterministischen Mittellaständerungen und überlagerten Schwingspielen gewonnenen Erkenntnisse auf zufallsartige Lastfolgen ist nicht ohne Einschränkungen zulässig.

Keine Erklärung kann für die teilweise gegenläufigen Tendenzen zwischen dem Örtlichen Konzept und der Lebensdauerprognose bei Metasafe 900 angeführt werden.

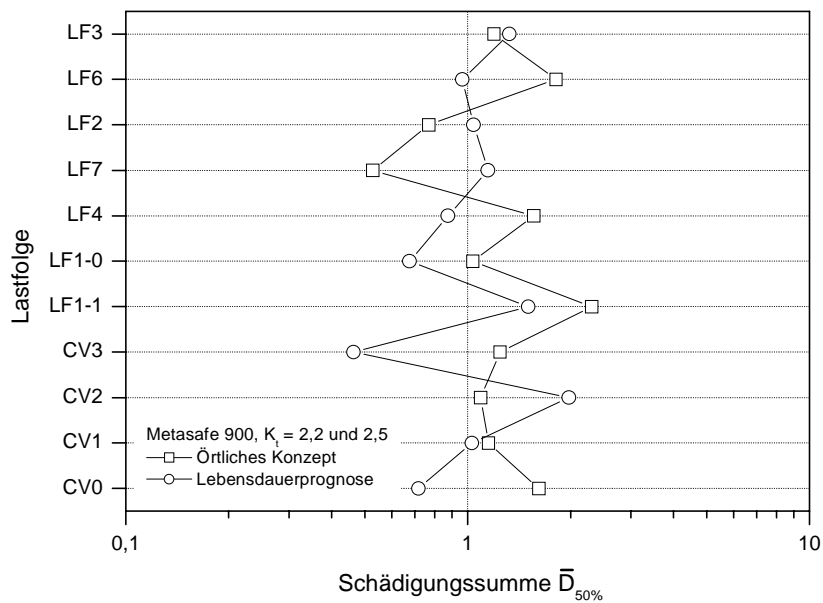
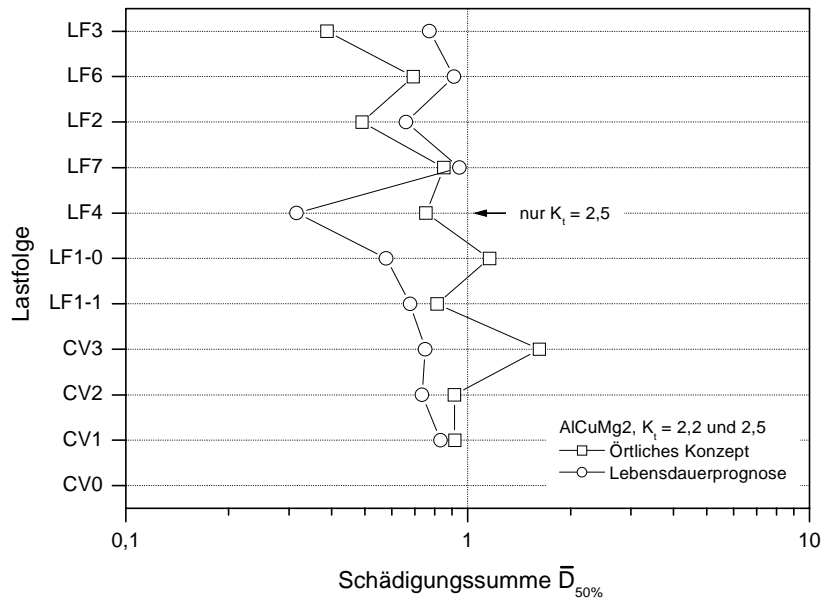


Abbildung 12 lastfolgetypische Schädigungssummen - Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose, AlCuMg2 und Metasafe 900

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Mittelpunkt der Untersuchungen zu Bauteil- und Reihenfolgeinflüssen unter praxisnahen Belastungen mit ausgeprägten Mittelwertänderungen standen zwei Werkstoffe; die Aluminiumknetlegierung AlCuMg2 und der mikrolegierte Stahl Metasafe 900 (vergleichbar mit 27MnSiVS6). Zur Schaffung der Grundlagen für eine spätere Anwendung mehrerer Lebensdauerabschätzungsverfahren wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm erarbeitet und durchgeführt. Neben Versuchen an gekerbten Proben war ein Großteil der Versuche auf die Phänomene des transienten Materialverhaltens ausgerichtet.

Ziel dieser Arbeit war es, im Nennspannungskonzept durch Berücksichtigung von integralen, den Werkstoff, das Bauteil und die Belastung beschreibenden Parametern eine Verbesserung der Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung zu erreichen. Die Lebensdauerabschätzung auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen und Beurteilung der Einflüsse des transienten Materialverhaltens und der Eingangsdaten bildeten weitere Schwerpunkte.

In den Experimenten zur grundlegenden Untersuchung des Werkstoffverhaltens wurde deutlich, daß bei elastisch-plastischer Beanspruchung bei beiden Werkstoffen von der Annahme eines sich nach kurzer zyklischer Belastung einstellenden stabilisierten Werkstoffzustandes abgewichen werden muß. Über die gesamte Lebensdauer wurde für AlCuMg2 verfestigendes, für Metasafe 900 entfestigendes Materialverhalten beobachtet. Die Werkstoffe reagieren unabhängig vom Vorzeichen und der Höhe einer eingebrachten Mittelspannung mit einem qualitativ gleichen Mittelspannungsabbau (Relaxation) in jedem Mitteldehnungsabschnitt. In den dehnungskontrollierten Mehrstufenversuchen wurde nachgewiesen, daß bei gleichgroßen Mitteldehnungsschwankungen weniger Mitteldehnungswechsel (gleichbedeutend mit mehr überlagerten Schwingspielen pro Mitteldehnungsabschnitt bei gleichbleibender Frequenz) generell zu einer Verlängerung der Lebensdauer führen. Vergleiche von Versuchen mit unterschiedlich großen Mitteldehnungsschwankungen zeigen: Bei betragsmäßig größeren langen¹ Mitteldehnungsabschnitten und gleicher überlagelter Belastung kann generell von einer Le-

¹ in den Versuchen 100 überlagerte sinusförmige Schwingspiele

bensdauerverkürzung ausgegangen werden. Dagegen führen betragsmäßig größere aber kurze¹ Mitteldehnungsabschnitte nicht zwangsläufig zu einer Verkürzung der Lebensdauer.

Für das Nennspannungskonzept wird mit der Einführung eines lastverhältnisabhängigen Kennwertes, der sich aus der Rainflow-Matrix bestimmen läßt, ein Verfahren vorgeschlagen, das bei beiden Werkstoffen zu einer Erhöhung der Treffsicherheit der Lebensdauervorhersage führte. Unter Berücksichtigung dieses lastverhältnisabhängigen Kennwertes und je einer bauteil- und werkstoffbeschreibenden Kenngröße wird mit einer über eine multiple Regressionsanalyse bestimmten Gleichung ein Korrekturfaktor berechnet, mit dem die ursprünglich berechnete Lebensdauer multipliziert wird. Daran schließen sich die Berechnung einer angepaßten Minersumme D_M und eine erneute statistische Auswertung an. Das Vorgehen ist mit der Anwendung der relativen MINER-Regel vergleichbar. An das Verfahren sind zwei Einschränkungen gebunden:

- Das Verfahren kann für Lastfolgen, deren Rainflow-Matrizen im Bereich positiver Mittelspannung mit $R \geq 0$ nicht belegt sind, nicht angewendet werden.
- Es wird nicht unterschieden zwischen einer mittellastfreien Lastfolge und derselben Lastfolge mit konstanter Mittellast.

Weiterführende Untersuchungen sollten die Zuverlässigkeit des Verfahrens an weiteren Datensätzen für Aluminiumlegierungen und Stahlwerkstoffe überprüfen. Eine geeignete Grundlage ist mit der Datensammlung Betriebsfestigkeit [EULI99-2] gegeben, wobei jedoch der Aufwand zur Bestimmung der Kennwerte (Belastung, Bauteil, Werkstoff) und der Koeffizienten der Regressionsgleichung hoch ist. Läßt sich die Zuverlässigkeit nachweisen, ist das vorgestellte Verfahren, unter Beachtung der genannten Einschränkungen, für zug- oder biegebelastete, nicht gefügte Bauteile aus AlCuMg2 und Metasafe 900 ohne Oberflächennachbehandlung unter normalen Umgebungsbedingungen (keine korrosiven Medien, keine thermischen Belastungen) anwendbar. Für eine komfortable und effektive Anwendung in der Praxis wäre jedoch eine programmtechnische Umsetzung unerlässlich.

¹ in den Versuchen 10 überlagerte sinusförmige Schwingspiele

Soll eine Lebensdauerabschätzung auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen erfolgen, empfiehlt sich

- für AlCuMg₂ die Anwendung des Programmes „Lebensdauerprognose“, das die Lebensdauer auf der Basis einer Regressionsgleichung abschätzt,
- für Metasafe 900 eine übliche Rechnung (Kerbsimulation und Schädigungsbewertung) nach dem Örtlichen Konzept.

Dabei sollten zwei in dieser Arbeit gewonnene Erkenntnisse Berücksichtigung finden:

- Die Anwendung des Uniform Material Law ist bei Lebensdauerabschätzungen nach dem Örtlichen Konzept für AlCuMg₂-Bauteile nicht zu empfehlen.
- Die Beanspruchung der verwendeten Flachproben bei axialer Zug-Druck-Belastung wird mit der erweiterten NEUBER-Regel deutlich überschätzt. Eine generelle Anwendung der erweiterten NEUBER-Regel bei Zug-Druck-Beanspruchung mit der Begründung eines Plastizierens des Grundquerschnittes schon bei geringen Spannungsüberhöhungen im Kerbgrund ist deshalb abzulehnen.

Aus Gründen der Kompatibilität zwischen bereits vorhandenen und den neu geschaffenen Datensätzen als Grundlage zur Bestimmung der Prognosegleichung erfolgte die Rechnung mit der „Lebensdauerprognose“ trotzdem mit den für das Örtliche Konzept nicht erfolgversprechenden Annahmen:

- Abschätzung der zyklischen Werkstoffparameter für AlCuMg₂ mit dem Uniform Material Law und
- Anwendung der erweiterten NEUBER-Regel bei Zug-Druck-Beanspruchung.

Durch Modifikation des Prognoseprogrammes hinsichtlich der Erweiterung des Wertebereiches, um die Verwendung der tatsächlichen Werkstoffkennwerte zu ermöglichen, sowie die Rechnung der gesamten Datenbasis mit der einfachen NEUBER-Regel und die Bestimmung neuer Regressionsgleichungen auf dieser Basis scheint eine Verbesserung der bisher erzielten Ergebnisse realistisch.

Inwieweit die gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen örtlicher Konzepte auf andere Aluminiumlegierungen und Stähle übertragbar sind, ist an dieser Stelle nicht vorhersehbar und sollte im Rahmen weiterer Untersuchungen z.B. mit dem r-Verfahren [WANG98] überprüft werden. Damit könnte zugleich hinsichtlich der Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung der Ver-

gleich zum Verfahren der Lebensdauerprognose angestellt werden. Mit dem r-Verfahren¹ wurde in [WANG98] nachweislich für Lastfolgen mit deterministischen und regellosen Mittellastschwankungen die Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Konzept erhöht.

Bei Betriebsbelastungen mit zufallsartigen Mittellaständerungen ist eine lineare Beschreibung der Änderung der Werkstoffparameter K' und n' , wie sie in [WENZ99] vorgeschlagen und hier für die CARLOS-Lastfolgen angewendet wurde, für die Verbesserung der Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Konzept ungenügend. Eine Verbesserung ist vermutlich nur zu erwarten, wenn neben einer zutreffenderen Beschreibung der zyklischen Ver- und Entfestigungsvorgänge auch die Mittelspannungsrelaxation berücksichtigt wird. Mit den Versuchen innerhalb dieser Arbeit wurde eine experimentelle Basis geschaffen, die eine Weiterentwicklung von Ansätzen zur Berücksichtigung des transienten Materialverhaltens in Konzepten auf der Basis örtlicher Beanspruchungen ermöglicht.

¹ Die zyklischen Kennwerte für AlCuMg2 wurden mit dem Uniform Material Law abgeschätzt. Bei Zug-Druck-Beanspruchung wurde die erweiterte NEUBER-Regel angewendet.

Literaturverzeichnis

- [AMST84] Amstutz, H.
Ellipsenförmige Einschlüsse in elastischer und elastisch-plastischer Matrix in ebenem Spannungszustand
Veröffentlichung des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Hochschule Darmstadt, Heft 42, 1984
- [BÄUM90] Bäuml, A, Seeger, T.
Materials Data for Cyclic Loading, Supplement 1
Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1990
- [BERG83] Bergmann, J. W.
Zur Betriebsfestigkeitsbemessung gekerbter Bauteile auf der Grundlage der örtlichen Beanspruchungen
Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik TH Darmstadt, 1983, Heft 37
- [BROS95] Brosius, G.
SPSS. Base System und Professional Statistics
International Thomson Publishing 1995
- [BUXB73] Buxbaum, O., Svenson, O.
Zur Beschreibung von Betriebsbeanspruchungen mit Hilfe statistischer Kenngrößen
Automobiltechnische Zeitschrift 75, S. 208-215, 1973
- [BUXB89] Buxbaum, O., Klätschke, H., Oppermann, H.
Zum Einfluß der Belastungsreihenfolge auf die Lebensdauer von Kerbstäben aus Stahl und Aluminium
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt
Bericht Nr. FB-186, 1989
- [BUXB92] Buxbaum, O.
Betriebsfestigkeit - Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile
Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 2. erweiterte Auflage 1992
- [BUXB95] Buxbaum, O., Kotte, K. L. et al.
Erhöhung der Genauigkeit der rechnerischen Lebensdauervorhersage durch Berücksichtigung der Belastungsreihenfolge
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, TU Dresden
Unveröffentlichter DFG-Abschlußbericht, 1995
- [CHRI97] Christ, H.-J., Frenz, D., Hammer, J., Koch, S.
Einfluß einer Mitteldehnung auf das Ermüdungsverhalten der Aluminiumlegierung AlMg5Mn
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 286, 1997, Nr. 2
- [CLOR85] Clormann, U. H., Seeger, T.
Rainflow-HCM, Ein Hysteresis-Schleifen-Zählalgorithmus auf werkstoffmechanischer Grundlage, FF-22, Fachgebiet Werkstoffmechanik, TH Darmstadt, 1985
- [COFF50] Coffin, L. F.
The flow and fracture of a brittle material
Journal of Applied Mechanics, Vol. 17 (Trans. ASME, Vol. 72), Sept. 1950, pp. 233-248

- [CORT56] Corten, H. T., Dolan, T. J.
Cumulative Fatigue Damage
Proc. International Conference on Fatigue of Metals, S. 235-246,
London 1956
- [DÖCK92] Döcke, H.
Erarbeitung einer Empfehlung zur vereinheitlichten statistischen Analyse von
Schwingfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsgebiet
Diplomarbeit, TU Dresden, 1992
- [EIFL82] Eifler, D., Macherauch, E.
Zyklisches Kriechen des Vergütungsstahles 42CrMo4 unter mittelspannungsbehafteter Zug-
Druck-Wechselbeanspruchung bei Raumtemperatur
Archiv für das Eisenhüttenwesen 53, 1982, Nr. 9
- [EULI79] Eulitz, K.-G.
Umrechnung ertragbarer Spannungen unter Kollektivbeanspruchung bei veränderten Bauteil-
und Beanspruchungskenngrößen
Dissertation, TU Dresden, 1979
- [EULI94] Eulitz, K.-G., Esderts, A., Kotte, K. L., Zenner, H.
Lebensdauervorhersage I. Verbesserung der Lebensdauerabschätzung durch systematische
Aufarbeitung und Auswertung vorliegender Versuchsreihen
Forschungshefte Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., heft 189, 1994
- [EULI99-1] Eulitz, K.-G.
Beurteilung der Zuverlässigkeit von Lebensdauervorhersagen nach dem
Nennspannungskonzept und Örtlichen Konzept anhand einer Sammlung von
Betriebsfestigkeitsversuchen
Habilitationsschrift 1999
- [EULI99-2] Eulitz, K.-G., Kotte, K. L.
Datensammlung Betriebsfestigkeit
VDMA Verlag GmbH, Frankfurt/M. 1999
- [GASS41] Gassner, E.
Auswirkung betriebsähnlicher Belastungsfolgen auf die Festigkeit von Flugzeugbauteilen
Dissertation, TH Darnstadt, 1941
- [GASS84] Gassner, E., Kreutz, P.
Bedeutung des Programmbelastungs-Versuchs als einfachste Form der Simulation
zufallsartiger Beanspruchungen
Fortschrittsbericht 80, VDI-Zeitschrift, Düsseldorf, 1984
- [GLAS95] Glaser, A., Eifler, D., Macherauch, E.
Zyklisches Kriechen und Mittelspannungsrelaxation bei Zugschwellbeanspruchung von
normalisiertem und vergütetem 42CrMo4
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 26, 1995, Nr. 2
- [GNIL80] Gnille, W.
Lebensdauerberechnung der Maschinenelemente, Berlin 1980
- [HAIB70] Haibach, E.
Modifizierte lineare Schadensakkumulationshypothese zur Berücksichtigung des
Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit Darmstadt
Bericht Nr. TM 50/70, 1970

- [HAIB80] Haibach, E., Matschke, C.
Betriebsfestigkeit von Kerbstäben aus Stahl Ck 45 und Stahl 42 CrMo 4
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt,
LBF-Bericht Nr. FB-155, 1980
- [HAIB89] Haibach, E.
Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, VDI-Verlag 1989
- [HARD60] Hardrath, H. F., Naumann, E. C.
Variable-Amplitude Fatigue Tests of Aluminium Alloy Specimens
Am. Soc. Test. Mat. STP 274, 1960, S. 125
- [HELL89] Hellmann, V., Landgraf, G.
CAD-System ALPHA zur Berechnung von ebenen und rotationssymmetrischen Bauteilen
mit konstruktiven Kerben
Handbuch, TU Dresden, 1989
- [HEUL86] Heuler, P., Vormwald, M., Seeger, T.
Relative Miner-Regel und U_0 -Verfahren – eine bewertende Gegenüberstellung
Materialprüfung 28 (3), 1986
- [HICK99] Hickethier, H.
Anwendungsorientierte Lebensdauerprognose aus Kennwerten des örtlichen
Beanspruchungsprozesses
Dissertation, TU Dresden, 1999
- [HÜCK81] Hück, M., Thrainer, L., Schütz, W.
Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguß und Grauguß - Synthetische
Wöhlerlinien
Bericht Nr. ABF 11 (zweite überarbeitete Fassung) der Arbeitsgemeinschaft
Betriebsfestigkeit im VDEh, Düsseldorf 1981
- [HÜCK83] Hück, M.
Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen
Zeitschrift für Werkstofftechnik (14), S. 406-417, 1983
- [KLÄT85] Klätschke, H., Steinhilber, H.
Trennung überlagerter Beanspruchungs-Zeit-Funktionen durch Filterung mit variabler
Trennfrequenz
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt,
Bericht Nr. TB-174, 1985
- [KOTT87] Kotte, K. L.
Lebensdauer stochastisch belasteter Bauteile unter besonderer Berücksichtigung
zweiparametrig ausgewerteter Beanspruchungen
Habilitation, TU Dresden 1987
- [KOTT93] Kotte, K. L., Eulitz, K.-G.
Zur Bewertung von Reihenfolge- und Mittelspannungswirkungen im regellosen
Beanspruchungsprozeß
Diskussionsgruppe Schwingfestigkeit, unveröffentlichter Vortrag,
TH Darmstadt, 1. April 1993
- [KOTT00] Kotte, K. L., Huth, H., Müller, M., Oppermann, H., Brandt, U.
Verbesserung der Treffsicherheit der Lebensdauervorhersagen durch Untersuchung und
Berücksichtigung der zeitabhängigen Werkstoffreaktionen
TU Dresden, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF
Unveröffentlichter DFG-Abschlußbericht, 2000

- [LANG37] Langer, B. F.
Fatigue Failure from Stress-Cycles of Varying Amplitude
ASME 59, 1937
- [LIPP68] Lipp, W.
Unterschiede in den Lebensdauerangaben nach Betriebsfestigkeitsversuchen gegenüber den
Ergebnissen aus Fahrversuchen
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit Darmstadt
LBF-Bericht Nr. TB-80, 1968
- [LOWA85] Lowak, H., Grubisic, V.
Möglichkeiten zur Lebensdauervorhersage für Bauteile aus Aluminiumlegierungen
Materialprüfung 27, 1985, Nr. 11, S. 337-343
- [MASI26] Masing, G.
Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing
Proc. of the 2nd Int. Congress of Applied Mechanics, 1926
- [MATS68] Matsuishi, M., Endo, T.
Fatigue of metals subjected to varying stress
Proc. of the Kyushu Branch of Japan Soc. of Mech. Eng., S. 37-40, Fukuoka, 1968
- [MINE45] Miner, M. A.
Cumulative Damage in Fatigue
Journal of Applied Mechanics 12, 1945, Nr. 3
- [NEUB61] Neuber, H.
Theory of Stress Concentrations for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary
Nonlinear Stress-Strain Law
Journal of Applied Mechanics 12, 1961
- [NEUM84] Neumann, P., Vehoff, H., Heitmann, H. H.
Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von Stahl: Reihenfolgeeffekte während der
Rißinitiationsphase
Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bericht T 84-040, 1984
- [NOWA93] Nowack, H.
Mechanisms in Variable Amplitude Fatigue
5th International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds
Montreal, 1993
- [OPPE97] Oppermann, H.
Schadigungsproportionale Beschreibung von Lastfolgen mit veränderlichen Mittellasten -
Das Trennverfahren -
Dissertation, Universität des Saarlandes, 1997
- [OSTE71] Ostermann, H.
Formzahlen von Flachstäben für Schwingfestigkeits-Versuche
Laboratorium für Betriebsfestigkeit Darmstadt, Technische Mitteilungen
TM Nr.61/71
- [PALM24] Palmgren, A.
Die Lebensdauer von Kugellagern
Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 68, 1924, Nr. 14
VDI-Verlag Düsseldorf

- [PERR87] Perret, B. H. E.
An Evaluation of a Method of Reconstituting Fatigue Loading from Rainflow-Counting
In: New Materials and Fatigue Resistant Aircraft Design
Proc. of the 14. ICAF-Symposium 1987, Ed. by D. L. Simpson, Engineering Materials
Advisory Services (EMAS), Warley 1988, S. 355-401
- [PRES56] Press, H., Meadows, M. T., Hadlock, J.
A reevaluation of data on atmospheric turbulence and airplane gust loads for application in
spectral calculations
NACA, Report 1272, 1956
- [RAMB43] Ramberg, W., Osgood, W. R.
Description of stress-strain curves by three parameters
Technical Note No. 902, NACA, 1943
- [RICE44] Rice, S. O.
Mathematical analysis of random noise
Bell Systems Technical Journal, Vol. 23 (1944), S. 282-332 und Vol. 24 (1944), S. 46-156
- [ROCH92] Rochlitz, H.
Lebensdauerprognose mit Kenngrößen der örtlichen Beanspruchungsmatrix
Dissertation, TU Dresden, 1992
- [ROSS64] Rossow, E.
Eine einfache Rechenschiebernäherung an die den normal scores entsprechenden
Prozentpunkte
Qualitätskontrolle, 9 (12), S. 146-147, 1964
- [SACH74] Sachs, L.
Angewandte Statistik
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 4. Auflage
- [SCHI72] Schijve, J.
The Accumulation of Fatigue Damage in Aircraft Materials and Structures
National Aerospace Laboratory NLR, AGARDograph No. 157, 1972
- [SCHÜ67] Schütz, W.
Über die Beziehung zwischen der Lebensdauer bei konstanter und bei veränderlicher
Beanspruchungsamplitude und ihre Anwendbarkeit auf die Bemessung von
Flugzeugbauteilen
Z. f. Flugwissenschaften 15 (1967) Heft 11
- [SCHÜ73] Schütz, D., Zenner, H.
Schadensakkumulationshypothesen zur Lebensdauervorhersage bei schwingender
Beanspruchung - ein kritischer Überblick
Werkstofftechnik, 4 (1, 2), S. 25-33, 97-102, 1973
- [SCHÜ76] Schütz, D., Lowak, H.
Zur Verwendung von Bemessungsunterlagen aus Versuchen mit betriebsähnlichen
Lastfolgen zur Lebensdauerabschätzung
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt
Bericht Nr. FB-109, 1976
- [SCHÜ90] Schütz, D., Klätschke, H., Steinhilber, H., Heuler, P., Schütz, W.
Standardisierte Lastabläufe für Bauteile von PKW Radaufhängungen
- CARLOS -
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt
Bericht Nr. FB-191, 1990

- [SCHW83] Schweiger, G.
Statistischer Größeneinfluß bei unregelmäßiger Schwingbeanspruchung
Dissertation, Hochschule der Bundeswehr, München, 1983
- [SMIT70] Smith, K. N., Watson, P., Topper, T. H.
A Stress-Strain Function for the Fatigue of Materials
International Journal of Materials 5 (4), 1970
- [SONS90] Sonsino, C. M., Kaufmann, H., Engels, A.
Schwingfestigkeit von festgewalzten, induktionsgehärteten sowie kombiniert behandelten
Eisen-Graphit-Gußwerkstoffen unter konstanten und zufallsartigen Belastungen
Gießereiforschung 42, Nr. 3, S. 110-121, 1990
- [SONS94] Sonsino, C. M., Störzel, K., Schöpfel, A., Buxbaum, O.
Verfahren zur Lebensdauerabschätzung auf der Basis von Rainflow-Matrizen örtlicher
Beanspruchungen
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt
Bericht Nr. 7662, 1990, unveröffentlicht
- [SVEN72] Svenson, O., Lipp, W.
Abschätzung der Bauteilfestigkeit bei zusammengesetzter Schwingbeanspruchung
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt
Bericht Nr. FB-101, 1972
- [VORM89] Vormwald, M.
Anrißlebensdauervorhersage auf der Basis der Schwingbruchmechanik für kurze Risse
Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Hochschule Darmstadt, Heft
47, 1989
- [WANG98] Wang, Q.
Ein integrales Modell zur Abschätzung der Bauteilbelastbarkeit - Bauteileinflüsse und
Reihenfolgeeinfluß
Dissertation, TU Dresden, 1998
- [WENZ99] Wenzel, T.
Kerbsimulation unter Berücksichtigung des transienten Materialverhaltens
Dissertation, TU Dresden, 1999
- [WIRT71] Wirtghe, G.
Einfluß veränderlicher Mittelspannungen auf die Betriebsdauer von Bauteilen
Institut für Leichtbau, Dresden
Bericht Nr. 530-19/71, 1971
- [ZENN92] Zenner, H., Liu, J.
Vorschlag zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept
Konstruktion 44, 1992, 1, S. 9-17

Abbildungsverzeichnis

Abbildungen im Textteil

- Abbildung 1 Versuchsaufbau und Wirkungsprinzip einer Mehrfach-Prüfeinrichtung
Abbildung 2 Anrißerkennung an einer abgesetzten Welle
Abbildung 3 Anrißerkennung an einem gelochten Flachstab
Abbildung 4 Systematik der Lastfolgen mit deterministischen Mittellaständerungen
Abbildung 5 Lastfolgen für dehnungsgesteuerte Versuche
Abbildung 6 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, Lastfolge CARLOS-V0, AlCuMg2 und Metasafe 900
Abbildung 7 Bestimmung der Rainflow-Matrizen in Abhängigkeit vom Lastverhältnis
Abbildung 8 HAIGH-Schaubild - Aufteilung in Bereiche
Abbildung 9 Kennwert $e^{|MV_1 - MV_2|}$ in Abhängigkeit von der Lastfolge
Abbildung 10 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, AlCuMg2 und Metasafe 900 ohne und mit Anpassung
Abbildung 11 lastfolgetypische Schädigungssummen - Einfluß der Werkstoffparameter, Örtliches Konzept, Metasafe 900
Abbildung 12 lastfolgetypische Schädigungssummen - Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose, AlCuMg2 und Metasafe 900

Abbildungen im Anlagenteil

- Abb. 1 Probenformen - ungekerbte Rund- und Flachprobe, abgesetzte Welle, gelochte Flachproben (nicht maßstäblich)
Abb. 2 Ausschnitt der Lastfolge CARLOS-V0 und ihrer Belastungsanteile
Abb. 3 Ausschnitt der Lastfolge CARLOS-V1 (TUD)
Abb. 4 Ausschnitt der Lastfolge CARLOS-V2 (TUD) und ihrer Belastungsanteile
Abb. 5 Ausschnitt der Lastfolge CARLOS-V3 (TUD) und ihrer Belastungsanteile
Abb. 6 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V0
Abb. 7 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V1 (TUD)
Abb. 8 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V2 (TUD)
Abb. 9 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V3 (TUD)
Abb. 10 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V1 (LBF)
Abb. 11 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V2 (LBF)
Abb. 12 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V3 (LBF)
Abb. 13 Extremwert- und Amplitudenkollektive der Lastfolge CARLOS-V0 und ihrer Belastungsanteile
Abb. 14 Extremwert- und Amplitudenkollektiv der Lastfolge CARLOS-V1 (TUD)

- Abb. 15 Extremwert- und Amplitudenkollektive der Lastfolge CARLOS-V2 (TUD) und ihrer Belastungsanteile
- Abb. 16 Extremwert- und Amplitudenkollektive der Lastfolge CARLOS-V3 (TUD) und ihrer Belastungsanteile
- Abb. 17 zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AlCuMg2 flach
- Abb. 18 zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AlCuMg2 rund
- Abb. 19 Anrißdehnungswöhlerlinie AlCuMg2 flach
- Abb. 20 Anrißdehnungswöhlerlinie AlCuMg2 rund
- Abb. 21 zügige und zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve Metasafe 900 flach
- Abb. 22 zügige und zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve Metasafe 900 rund
- Abb. 23 Anrißdehnungswöhlerlinie Metasafe 900 flach
- Abb. 24 Anrißdehnungswöhlerlinie Metasafe 900 rund

AlCuMg2 flach

- Abb. 25 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$
- Abb. 26 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$
- Abb. 27 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = +4\text{‰}$
- Abb. 28 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = +4\text{‰}$
- Abb. 29 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = -4\text{‰}$
- Abb. 30 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = -4\text{‰}$

AlCuMg2 rund

- Abb. 31 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$
- Abb. 32 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$
- Abb. 33 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = +4\text{‰}$
- Abb. 34 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = +4\text{‰}$
- Abb. 35 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = -4\text{‰}$
- Abb. 36 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = -4\text{‰}$

Metasafe 900 flach

- Abb. 37 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$
- Abb. 38 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$
- Abb. 39 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = +4\text{‰}$
- Abb. 40 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = +4\text{‰}$
- Abb. 41 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = -4\text{‰}$
- Abb. 42 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = -4\text{‰}$

Metasafe 900 rund

- Abb. 43 Mittelspannung; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$
- Abb. 44 Spannungsamplitude; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$

AlCuMg2 flach

- Abb. 45 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = 0\%$
Abb. 46 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = +4\%$
Abb. 47 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4\%$

AlCuMg2 rund

- Abb. 48 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = 0\%$
Abb. 49 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = +4\%$
Abb. 50 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4\%$

Metasafe 900 flach

- Abb. 51 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = 0\%$
Abb. 52 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = +4\%$
Abb. 53 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4\%$

Metasafe 900 rund

- Abb. 54 plastische Dehnungsamplitude; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = 0\%$

AlCuMg2 flach; Mittelspannung, Spannungsamplitude

- Abb. 55 Lastfolge lfcd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 3\%$
Abb. 56 Lastfolge lfcb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 3\%$
Abb. 57 Lastfolge lfad; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 4\%$
Abb. 58 Lastfolge lfab; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 4\%$
Abb. 59 Lastfolge lfbd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 5\%$
Abb. 60 Lastfolge lfbb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 5\%$

Metasafe 900 flach; Mittelspannung, Spannungsamplitude

- Abb. 61 Lastfolge lfbd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -2; 0; +2\%$; $\epsilon_{a,t} = 3\%$
Abb. 62 Lastfolge lfbb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -2; 0; +2\%$; $\epsilon_{a,t} = 3\%$
Abb. 63 Lastfolge lffd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -3; 0; +3\%$; $\epsilon_{a,t} = 4\%$
Abb. 64 Lastfolge lfbb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -3; 0; +3\%$; $\epsilon_{a,t} = 4\%$
Abb. 65 Lastfolge lfcd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 3\%$
Abb. 66 Lastfolge lfcb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 3\%$
Abb. 67 Lastfolge lfad; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 4\%$
Abb. 68 Lastfolge lfab; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 4\%$
Abb. 69 Lastfolge lfbd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 5\%$
Abb. 70 Lastfolge lfbb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4; 0; +4\%$; $\epsilon_{a,t} = 5\%$
Abb. 71 Lastfolge lfcd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -5; 0; +5\%$; $\epsilon_{a,t} = 3\%$
Abb. 72 Lastfolge lfcb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -5; 0; +5\%$; $\epsilon_{a,t} = 3\%$
Abb. 73 Lastfolge lfhd; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -5; 0; +5\%$; $\epsilon_{a,t} = 4\%$

Abb. 74 Lastfolge lfhb; ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -5; 0; +5\%$; $\epsilon_{a,t} = 4\%$

AlCuMg2; $K_t = 1,5$; Planbiegung

Abb. 75 Wöhlerlinie; $R = -1$

Abb. 76 Wöhlerlinie; $R = 0$

Abb. 77 Lebensdauerlinie; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

Abb. 78 Lebensdauerlinie; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

Abb. 79 Lebensdauerlinie; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

Abb. 80 Lebensdauerlinie; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

AlCuMg2; $K_t = 2,2$; Planbiegung

Abb. 81 Wöhlerlinie; $R = -1$

Abb. 82 Wöhlerlinie; $R = 0$

Abb. 83 Lebensdauerlinie; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

Abb. 84 Lebensdauerlinie; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

Abb. 85 Lebensdauerlinie; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

Abb. 86 Lebensdauerlinie; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

AlCuMg2; $K_t = 2,5$; Zug-Druck

Abb. 87 Wöhlerlinie; $R = -1$

Abb. 88 Wöhlerlinie; $R = 0$

Abb. 89 Lebensdauerlinie; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

Abb. 90 Lebensdauerlinie; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

Abb. 91 Lebensdauerlinie; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

Abb. 92 Lebensdauerlinie; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

AlCuMg2; $K_t = 3,6$; Zug-Druck

Abb. 93 Wöhlerlinie; $R = -1$

Abb. 94 Wöhlerlinie; $R = 0$

Abb. 95 Lebensdauerlinie; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

Abb. 96 Lebensdauerlinie; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

Abb. 97 Lebensdauerlinie; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

Abb. 98 Lebensdauerlinie; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

Abb. 99 Lebensdauerlinie; Lastfolge LF1-1; $\bar{R} = -1$

Abb. 100 Lebensdauerlinie; Lastfolge LF1-0; $\bar{R} = 0$

Abb. 101 Lebensdauerlinie; Lastfolge LF3; $\bar{R} = -1$

Metasafe 900; $K_t = 1,5$; Planbiegung

- Abb. 102 Wöhlerlinie; $R = -1$
- Abb. 103 Wöhlerlinie; $R = 0$
- Abb. 104 Lebensdauerlinie; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$
- Abb. 105 Lebensdauerlinie; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$
- Abb. 106 Lebensdauerlinie; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$
- Abb. 107 Lebensdauerlinie; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

Metasafe 900; $K_t = 2,2$; Planbiegung

- Abb. 108 Wöhlerlinie; $R = -1$
- Abb. 109 Wöhlerlinie; $R = 0$
- Abb. 110 Lebensdauerlinie; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$
- Abb. 111 Lebensdauerlinie; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$
- Abb. 112 Lebensdauerlinie; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$
- Abb. 113 Lebensdauerlinie; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

Metasafe 900; $K_t = 2,5$; Zug-Druck

- Abb. 114 Wöhlerlinie; $R = -1$
- Abb. 115 Wöhlerlinie; $R = 0$
- Abb. 116 Lebensdauerlinie; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$
- Abb. 117 Lebensdauerlinie; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$
- Abb. 118 Lebensdauerlinie; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$
- Abb. 119 Lebensdauerlinie; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

Metasafe 900; $K_t = 3,6$; Zug-Druck

- Abb. 120 Wöhlerlinie; $R = -1$
- Abb. 121 Wöhlerlinie; $R = 0$
- Abb. 122 Lebensdauerlinie; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$
- Abb. 123 Lebensdauerlinie; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$
- Abb. 124 Lebensdauerlinie; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$
- Abb. 125 Lebensdauerlinie; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$
- Abb. 126 Lebensdauerlinie; Lastfolge LF1-1; $\bar{R} = -1$
- Abb. 127 Lebensdauerlinie; Lastfolge LF1-0; $\bar{R} = 0$
- Abb. 128 Lebensdauerlinie; Lastfolge LF3; $\bar{R} = -1$

- Abb. 129 CARLOS-Lebensdauerlinien je Formzahl, AlCuMg₂, Metasafe 900
- Abb. 130 CARLOS-Lebensdauerlinien aller Formzahlen, AlCuMg₂, Metasafe 900
- Abb. 131 Varianten des HAIGH-Schaubildes

- Abb. 132 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, CARLOS- Lastfolgen, AlCuMg2
- Abb. 133 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, CARLOS- Lastfolgen, Metasafe 900
- Abb. 134 Mittelspannungsverhältnisse MV_1 , MV_2 und Kennwert $e^{|MV_1-MV_2|}$
- Abb. 135 $\log D_{50\%}$ vs. lastfolgeabhängiger Kennwert $e^{|MV_1-MV_2|}$ für AlCuMg2
- Abb. 136 $\log D_{50\%}$ vs. lastfolgeabhängiger Kennwert $e^{|MV_1-MV_2|}$ für Metasafe 900

Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch

- Abb. 137 LF1 bis LF7, AlCuMg2, ohne und mit Anpassung
- Abb. 138 CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, AlCuMg2, ohne und mit Anpassung
- Abb. 139 LF1 bis LF7, Metasafe 900, ohne und mit Anpassung
- Abb. 140 CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, Metasafe 900, ohne und mit Anpassung
- Abb. 141 lastfolgetypische Schädigungssummen - AlCuMg2 und Metasafe 900

Verteilung der Schädigungssummen, Örtliches Konzept

- Abb. 142 Einfluß der Werkstoffkennwerte, LF1 bis LF7, AlCuMg2 und Metasafe 900
- Abb. 143 Einfluß der NEUBER-Regel, CARLOS-Lastfolgen, AlCuMg2
- Abb. 144 Einfluß der NEUBER-Regel, LF1 bis LF7, AlCuMg2
- Abb. 145 Einfluß der NEUBER-Regel, CARLOS-Lastfolgen, Metasafe 900
- Abb. 146 Einfluß der NEUBER-Regel, LF1 bis LF7, Metasafe 900
- Abb. 147 Kerbsimulation ohne und mit Entfestigung, CARLOS-Lastfolgen, Metasafe 900

Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose

- Abb. 148 Verteilung der Schädigungssummen, AlCuMg2
- Abb. 149 Verteilung der Schädigungssummen, Metasafe 900

Tabellenverzeichnis

Tabellen im Textteil

Tabelle 1	Formzahlen und bezogene Spannungsgefälle
Tabelle 2	Anrißtiefen an abgesetzten Wellen aus Metasafe 900
Tabelle 3	Kurzcharakteristik der Lastfolgen CARLOS-V0, V1, V2 und V3
Tabelle 4	Schwingspielzahlen zur Bestimmung nachzurechnender Horizonte (CARLOS)
Tabelle 5	Kennwerte der Lebensdauervorhersage ohne und mit Anpassung, Nennspannungskonzept, Bruch, HAIGH Variante 1, geschätzte Mittelspannungsempfindlichkeit, MINER modifiziert
Tabelle 6	Kennwerte der Lebensdauervorhersage ohne und mit Anpassung, Nennspannungskonzept, Bruch, HAIGH Variante 1, geschätzte Mittelspannungsempfindlichkeit, MINER modifiziert, nach Werkstoffen getrennt
Tabelle 7	zyklische Kennwerte AlCuMg ₂ und Metasafe 900 aus [BUXB95]
Tabelle 8	Einfluß der Werkstoffparameter auf die Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Konzept
Tabelle 9	Kennwerte der Lebensdauervorhersage - Einfluß der NEUBER-Regel, Örtliches Konzept, MINER original, P_{SWT}
Tabelle 10	Kennwerte der Lebensdauervorhersage - Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose

Tabellen im Anlagenteil

Tab. 1	Charakterisierung der Halbzeuge
Tab. 2	chemische Zusammensetzung AlCuMg ₂ [Masse-%]
Tab. 3	chemische Zusammensetzung Metasafe 900 [Masse-%]
Tab. 4	statische Kennwerte AlCuMg ₂ und Metasafe 900
Tab. 5	zyklische Kennwerte AlCuMg ₂ und Metasafe 900
Tab. 6	zyklische Kennwerte AlCuMg ₂ und Metasafe 900 aus dem UML
Tab. 7	Versuchsprogramm an der TUD - ungekerbte Proben
Tab. 8	Versuchsprogramm am LBF - gekerbte Proben
Tab. 9	Versuchsprogramm an der TUD - gekerbte Proben
Tab. 10	Kennwerte der CARLOS-Lastfolgen und der Lastfolgen LF1 bis LF7 (aus den Rainflow-Matrizen bestimmt)
Tab. 11	Kenngrößen der Rainflow-Matrizen der CARLOS-Lastfolgen und der Lastfolgen LF1 bis LF7
Tab. 12	Kennwerte der Wöhlerversuche ($P_U = 50\%$); AlCuMg ₂
Tab. 13	Kennwerte der Lebensdauerversuche ($P_U = 50\%$); AlCuMg ₂
Tab. 14	Kennwerte der Wöhlerversuche ($P_U = 50\%$); Metasafe 900

Tab. 15	Kennwerte der Lebensdauerversuche ($P_0 = 50\%$); Metasafe 900
Tab. 16	Neigungsexponenten \bar{k} der CARLOS-Lebensdauerlinien - Statistik der Regressionsparameter
Tab. 17	Neigungsexponenten \bar{k} der CARLOS-Lebensdauerlinien für die Lebensdauerrechnungen

Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, Nennspannungskonzept

Tab. 18	MM, AlCuMg2, CARLOS-V0
Tab. 19	MM, AlCuMg2, CARLOS-V1
Tab. 20	MM, AlCuMg2, CARLOS-V2
Tab. 21	MM, AlCuMg2, CARLOS-V3
Tab. 22	MM, AlCuMg2, LF1-1
Tab. 23	MM, AlCuMg2, LF1-0
Tab. 24	MM, AlCuMg2, LF2
Tab. 25	MM, AlCuMg2, LF3
Tab. 26	MM, AlCuMg2, LF4
Tab. 27	MM, AlCuMg2, LF6
Tab. 28	MM, AlCuMg2, LF7
Tab. 29	MM, Metasafe 900, CARLOS-V0
Tab. 30	MM, Metasafe 900, CARLOS-V1
Tab. 31	MM, Metasafe 900, CARLOS-V2
Tab. 32	MM, Metasafe 900, CARLOS-V3
Tab. 33	MM, Metasafe 900, LF1-1
Tab. 34	MM, Metasafe 900, LF1-0
Tab. 35	MM, Metasafe 900, LF2
Tab. 36	MM, Metasafe 900, LF3
Tab. 37	MM, Metasafe 900, LF4
Tab. 38	MM, Metasafe 900, LF6
Tab. 39	MM, Metasafe 900, LF7

Tab. 40	angepaßte Minersumme - Statistik der Regressionsparameter
Tab. 41	Schädigungssummen D_{Regr} aus multipler Regression CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, AlCuMg2
Tab. 42	Schädigungssummen D_{Regr} aus multipler Regression CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, Metasafe 900

Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose

Tab. 43	OM, AlCuMg2, CARLOS-V0
Tab. 44	OM, AlCuMg2, CARLOS-V1
Tab. 45	OM, AlCuMg2, CARLOS-V2
Tab. 46	OM, AlCuMg2, CARLOS-V3
Tab. 47	OM, AlCuMg2, LF1-1
Tab. 48	OM, AlCuMg2, LF1-0
Tab. 49	OM, AlCuMg2, LF2
Tab. 50	OM, AlCuMg2, LF3

Tab. 51	OM, AlCuMg2, LF4
Tab. 52	OM, AlCuMg2, LF6
Tab. 53	OM, AlCuMg2, LF7
Tab. 54	OM, Metasafe 900, CARLOS-V0
Tab. 55	OM, Metasafe 900, CARLOS-V1
Tab. 56	OM, Metasafe 900, CARLOS-V2
Tab. 57	OM, Metasafe 900, CARLOS-V3
Tab. 58	OM, Metasafe 900, LF1-1
Tab. 59	OM, Metasafe 900, LF1-0
Tab. 60	OM, Metasafe 900, LF2
Tab. 61	OM, Metasafe 900, LF3
Tab. 62	OM, Metasafe 900, LF4
Tab. 63	OM, Metasafe 900, LF6
Tab. 64	OM, Metasafe 900, LF7

**Anlagen
(Tabellen)
zur**

**Dissertationsschrift
„Werkstoff-, Geometrie- und Reihenfolgeinflüsse
auf die Lebensdauer unter Betriebslasten“**

angenommen von der
Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

Dipl.-Ing. Matthias Müller
geb. am 11. Januar 1969 in Dresden

AlCuMg2	Metasafe 900
Halbzeug: Platten Hersteller/ Lieferant: Hoogovens Aluminium, Koblenz; Westdeutscher Metallhandel, Essen Abmessungen: 1000 × 2000 (mm ²), 6 mm dick	Halbzeug: Vierkantblock Hersteller/ Lieferant: Ascometal, Hagondange (Frankreich); Niobium Products Company GmbH, Düsseldorf Abmessungen: 110 × 110 (mm ²) — Walzung → 5 × 50 (mm ²)
Halbzeug: Rundstangen Hersteller/ Lieferant: Otto Fuchs Metallwerke, Meinerzhagen Abmessungen: 6000 × Ø 42 (mm ²) 4000 × Ø 42 (mm ²)	Halbzeug: Rundstangen Hersteller/ Lieferant: Ascometal, Hagondange (Frankreich); Niobium Products Company GmbH, Düsseldorf Abmessungen: 1200 × Ø 42 (mm ²), 1000 × Ø 42 (mm ²)

Tab. 1 Charakterisierung der Halbzeuge

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
flach	0,08	0,20	4,45	0,59	1,42	0,01	0,10	0,03	0,01
rund 1. Charge	0,05	0,13	4,17	0,84	1,83	0,09	n.n.	0,04	0,11
rund 2. Charge	0,07	0,15	4,2	0,8	1,4	0,01	0,18	0,04	0,11

Tab. 2 chemische Zusammensetzung AlCuMg2 [Masse-%]

Material	C	Si	Cu	Mn	S	Cr	P	Ni	Mo	Al
flach/rund	0,27	0,11	0,17	1,76	0,03	0,25	0,01	0,10	0,05	0,05

Tab. 3 chemische Zusammensetzung Metasafe 900 [Masse-%]

Parameter	AlCuMg2			Metasafe 900	
	Flachmaterial	Rundmaterial		Flachmaterial	Rundmaterial
		1. Charge	2. Charge		
R_m [MPa]	490	586	569	870	845
$R_{p0,2}$ [MPa]	310	430	438	616	650
A_5 [%]	16,5	10,8	12,5	17,9	17,7
E [MPa]	75.000	75.000	75.000	200.000	200.000

Tab. 4 statische Kennwerte AlCuMg2 und Metasafe 900

Parameter	AlCuMg2		Metasafe 900	
	Flachmaterial	Rundmaterial	Flachmaterial	Rundmaterial
		1. und 2. Charge		
$R'_{p0,2}$ [MPa]	420	537	549	547
K' [MPa]	581	656	1204	1219
n'	0,0522	0,0322	0,1264	0,1290
σ'_f [MPa]	1135	1124	982	906
b	-0,1411	-0,1240	-0,0639	-0,0577
ϵ'_f	0,1974	0,0062	0,1995	0,1003
c	-0,5851	-0,3052	-0,5057	-0,4472
ϵ_D	0,00200	0,00200	0,00195	0,00195

Tab. 5 zyklische Kennwerte AlCuMg2 und Metasafe 900

Parameter	AlCuMg2			Metasafe 900	
	Flachmaterial	Rundmaterial		Flachmaterial	Rundmaterial
		1. und 2. Charge			
R _m [MPa]	490	586	569	870	845
E [MPa]	75.000	75.000	75.000	200.000	200.000
K' [MPa]	789	943	916	1436	1394
n'	0,1100	0,1100	0,1100	0,1500	0,1500
σ _f ' [MPa]	818	979	950	1305	1268
b	-0,0950	-0,0950	-0,0950	-0,0870	-0,0870
ε _f '	0,3500	0,3500	0,3500	0,4904	0,4997
c	-0,6900	-0,6900	-0,6900	-0,5800	-0,5800
ε _D	0,00274	0,00328	0,00319	0,00212	0,00207

Tab. 6 zyklische Kennwerte AlCuMg2 und Metasafe 900 aus dem UML

Werkstoffverhalten

(dehnungsgesteuerte Versuche für zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve, Dehnungswöhlerlinie, und Mittelspannungsverhalten)

Versuchsart	IST	Einstufenversuche	Mehrstufenversuche
Form der Belastung	Dreieck	Sinus	Rechteck mit überlagertem Sinus
		ϵ_m : 0‰; - 4‰; + 4‰	

AlCuMg2

Zug-Druck axial

- 1. Charge rund, $K_t = 1$
- 2. Charge rund, $K_t = 1$
- 1. Charge flach, $K_t = 1$

×	×	
	×	
×	×	×

Metasafe 900

Zug-Druck axial

- 2. Lieferung rund, $K_t = 1$
- 1. Walzung flach, $K_t = 1$
- 2. Walzung flach, $K_t = 1$

×	×	
×	×	×
	×	×

Tab. 7 Versuchsprogramm an der TUD - ungekerbte Proben

AlCuMg2

Versuchsart

Bauteilverhalten (kraftgesteuerte Versuche für Nennspannungswöhlerlinien und Lebensdauerlinien)

Einstufenversuche
mit sinusförmiger
Belastung

Betriebsfestigkeitsversuche mit Lastfolgen

LF 1

LF 3

CARLOS
Lateral

Varianten von CARLOS Lateral

$R = -1$

$R = 0$

$\bar{R} = -1$

$\bar{R} = 0$

$\bar{R} = -1$

V0

V1

V2

V3

Biegung

1. Charge rund, $K_t = 1,5$

2. Charge rund, $K_t = 1,5$

1. Charge rund, $K_t = 2,2$

2. Charge rund, $K_t = 2,2$

×	×							
×	×				×	×	×	×
×	×							
×	×				×	×	×	×

Zug-Druck axial

1. Charge flach, $K_t = 2,5$

1. Charge flach, $K_t = 3,6$

×	×				×	×	×	×
×	×	×	×	×	×	×	×	×

.. Stichprobenversuche

Tab. 8 Versuchsprogramm am LBF - gekerbte Proben

Metasafe 900

Versuchsart

Bauteilverhalten (kraftgesteuerte Versuche für Nennspannungswöhlerlinien und Lebensdauerlinien)

Einstufenversuche
mit sinusförmiger
Belastung

Betriebsfestigkeitsversuche mit Lastfolgen

LF 1

LF 3

CARLOS
Lateral

Varianten von CARLOS Lateral

R = -1

R = 0

$\bar{R} = -1$

$\bar{R} = 0$

$\bar{R} = -1$

V0

V1

V2

V3

Biegung

1. Lieferung rund, $K_t = 1,5$

2. Lieferung rund, $K_t = 1,5$

1. Lieferung rund, $K_t = 2,2$

2. Lieferung rund, $K_t = 2,2$

×	×							
×	×				×	×	×	×
×	×							
×	×				×	×	×	×

Zug-Druck axial

1. und 2. Walzung flach, $K_t = 2,5$

1. Walzung flach, $K_t = 3,6$

2. Walzung flach, $K_t = 3,6$

		×	×		×	×	×	×
×		×	×	×	×	×	×	×
×	×		×	×	×	×	×	×

.. Stichprobenversuche

Tab. 9 Versuchsprogramm an der TUD - gekerbte Proben

Lastfolge	\bar{R}	H	C_r	$C_{r,m}$	$C_{r,a}$	V_{\min}	V_{\max}	V_a	MV	MV_1	MV_2
	[SP]										
CARLOS-V0	-0,64	95180	4,299	4,284	6,646	0,384	0,445	0,345	0,834	0,353	0,602
CARLOS-V1 (TUD)	-1	95028	5,594	7,424	5,937	0,347	0,363	0,350	0,968	0,410	0,704
CARLOS-V2 (TUD)	-0,63	94979	5,928	5,901	8,512	0,371	0,339	0,266	0,740	0,406	0,494
CARLOS-V3 (TUD)	-0,53	94237	5,067	5,155	10,423	0,349	0,422	0,308	0,787	0,204	0,474
CARLOS-V1 (LBF)	-1	95024	5,295	7,479	5,601	0,363	0,369	0,355	0,969	0,417	0,705
CARLOS-V2 (LBF)	-0,63	94987	5,690	5,623	8,234	0,381	0,349	0,270	0,743	0,427	0,511
CARLOS-V3 (LBF)	-0,53	94265	4,889	5,042	10,182	0,370	0,426	0,311	0,781	0,204	0,513
LF1-1 bzw. LF1-0	-1/0	101000	4,985	3,256	5,085	0,398	0,398	0,394	0,99	1,000	0,676
LF2	-0,5	202000	2,738	1,247	7,683	0,549	0,549	0,283	0,517	0,965	0,929
LF3	-1	202000	1,933	1,125	10,246	0,654	0,654	0,262	0,401	0,962	0,986
LF4	-1	101051	9,823	12,511	10,143	0,297	0,398	0,290	0,836	0,962	0,986
LF6	-0,5	202000	2,742	1,254	7,493	0,549	0,549	0,336	0,612	0,963	0,921
LF7	-0,5	202000	2,738	1,246	7,706	0,549	0,549	0,264	0,482	0,949	0,932

Tab. 10 Kennwerte der CARLOS-Lastfolgen und der Lastfolgen LF1 bis LF7 (aus den Rainflow-Matrizen bestimmt)

Lastfolge	Matrixdimension [Klassen]	Minimum [Klasse]	Maximum [Klasse]	Nulldurchgang [Klasse]
CARLOS-V0	64	14	64	34
CARLOS-V1 (LBF/TUD)	64	1	64	32,5 (32 → 33)
CARLOS-V2 (LBF/TUD)	64	1	64	25
CARLOS-V3 (LBF/TUD)	64	1	64	23
LF1	32	1	32	16,5 (16 → 17)
LF2	64	17	64	33
LF3	64	1	64	32,5 (32 → 33)
LF4	64	1	64	32,5 (32 → 33)
LF6	64	17	64	33
LF7	64	17	64	33

Tab. 11 Kenngrößen der Rainflow-Matrizen der CARLOS-Lastfolgen und der Lastfolgen LF1 bis LF7

		Wöhlerversuche (kraftgesteuert)			
		R = -1	R = -1	R = 0	R = 0
		Anriß	Bruch	Anriß	Bruch
Planbiegung	$K_t = 1,5$	keine Ergebnisse	$k = 4,7$ $S_{a,D} = 125 \text{ MPa}$ $N_D = 860.380$	keine Ergebnisse	$k = 5,6$ $S_{a,D} = 105 \text{ MPa}$ $N_D = 740.980$
	$K_t = 2,2$	keine Ergebnisse	$k = 5,3$ $S_{a,D} = 95 \text{ MPa}$ $N_D = 1.439.200$	keine Ergebnisse	$k = 4,3$ $S_{a,D} = 65 \text{ MPa}$ $N_D = 959.250$
Zug-Druck (axial)	$K_t = 2,5$	$k = 6,5$ $S_a = 70 \text{ MPa}$ $N = 2.902.700$	$k = 6,2$ $S_{a,D} = 70 \text{ MPa}$ $N_D = 3.315.400$	$k = 3,8$ $S_a = 50 \text{ MPa}$ $N = 624.980$	$k = 3,9$ $S_{a,D} = 50 \text{ MPa}$ $N_D = 739.710$
	$K_t = 3,6$	$k = 6,9$ $S_a = 60 \text{ MPa}$ $N = 1.426.700$	$k = 5,9$ $S_{a,D} = 60 \text{ MPa}$ $N_D = 2.313.100$	$k = 5,6$ $S_a = 42 \text{ MPa}$ $N = 1.399.500$	$k = 5,3$ $S_{a,D} = 42 \text{ MPa}$ $N_D = 1.544.200$

Tab. 12 Kennwerte der Wöhlerversuche ($P_{\bar{U}} = 50\%$); AlCuMg2

		Lebensdauerversuche (kraftgesteuert)			
		CARLOS-V0		CARLOS-V1	
		$\bar{R} = -0,64$	$\bar{R} = -0,64$	$\bar{R} = -1$	$\bar{R} = -1$
		Anriß	Bruch	Anriß	Bruch
Planbiegung	$K_t = 1,5$	keine Ergebnisse	$\bar{k} = 7,4$ $\bar{S}_a = 242 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	keine Ergebnisse	$\bar{k} = 7,6$ $\bar{S}_a = 252 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
	$K_t = 2,2$	keine Ergebnisse	$\bar{k} = 6,8$ $\bar{S}_a = 182 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,9$ $\bar{S}_a = 157 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,8$ $\bar{S}_a = 179 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
Zug-Druck (axial)	$K_t = 2,5$	$\bar{k} = 7,0$ $\bar{S}_a = 122 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,1$ $\bar{S}_a = 129 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,5$ $\bar{S}_a = 116 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,6$ $\bar{S}_a = 126 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
	$K_t = 3,6$	$\bar{k} = 6,5$ $\bar{S}_a = 100 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,9$ $\bar{S}_a = 102 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,0$ $\bar{S}_a = 90 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,7$ $\bar{S}_a = 105 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$

Tab. 13 Kennwerte der Lebensdauerversuche ($P_{\bar{U}} = 50\%$); AlCuMg2; (Teil 1)

		Lebensdauerversuche (kraftgesteuert)			
		CARLOS-V2		CARLOS-V3	
		$\bar{R} = -0,63$	$\bar{R} = -0,63$	$\bar{R} = -0,53$	$\bar{R} = -0,53$
		Anriß	Bruch	Anriß	Bruch
Planbiegung	$K_t = 1,5$	keine Ergebnisse	$\bar{k} = 6,0$ $\bar{S}_a = 261 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,8$ $\bar{S}_a = 237 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,5$ $\bar{S}_a = 257 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
	$K_t = 2,2$	$\bar{k} = 6,3$ $\bar{S}_a = 189 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,2$ $\bar{S}_a = 200 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,4$ $\bar{S}_a = 177 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,1$ $\bar{S}_a = 183 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
Zug-Druck (axial)	$K_t = 2,5$	$\bar{k} = 8,4$ $\bar{S}_a = 161 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,2$ $\bar{S}_a = 166 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 7,4$ $\bar{S}_a = 141 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,4$ $\bar{S}_a = 142 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
	$K_t = 3,6$	$\bar{k} = 5,2$ $\bar{S}_a = 112 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,6$ $\bar{S}_a = 133 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,3$ $\bar{S}_a = 110 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,2$ $\bar{S}_a = 118 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$

Tab. 13 Kennwerte der Lebensdauerversuche ($P_{\bar{U}} = 50\%$); AlCuMg2; (Teil 2)

Zug-Druck (axial) $K_t = 3,6$	Lebensdauerversuche (kraftgesteuert)			
	Lastfolge LF1		Lastfolge LF3	
	Anriß	Bruch	Anriß	Bruch
$\bar{R} = -1$	$\bar{k} = 7,0$ $\bar{S}_a = 91 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,5$ $\bar{S}_a = 100 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,8$ $\bar{S}_a = 95 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,6$ $\bar{S}_a = 99 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
$\bar{R} = 0$	$\bar{k} = 7,2$ $\bar{S}_a = 66 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,6$ $\bar{S}_a = 66 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$		

Tab. 13 Kennwerte der Lebensdauerversuche ($P_{\bar{U}} = 50\%$); AlCuMg2; (Teil 3)

		Wöhlerversuche (kraftgesteuert)			
		R = -1	R = -1	R = 0	R = 0
		Anriß	Bruch	Anriß	Bruch
Planbiegung	$K_t = 1,5$	$k = 5,6$ $S_a = 240 \text{ MPa}$ $N = 576.920$	$k = 4,7$ $S_{a,D} = 240 \text{ MPa}$ $N_D = 946.260$	$k = 6,2$ $S_a = 210 \text{ MPa}$ $N = 628.940$	$k = 5,3$ $S_{a,D} = 210 \text{ MPa}$ $N_D = 694.360$
	$K_t = 2,2$	$k = 5,1$ $S_a = 185 \text{ MPa}$ $N = 594.920$	$k = 4,0$ $S_{a,D} = 185 \text{ MPa}$ $N_D = 1.112.000$	$k = 4,5$ $S_a = 150 \text{ MPa}$ $N = 681.440$	$k = 4,1$ $S_{a,D} = 150 \text{ MPa}$ $N_D = 773.920$
Zug-Druck (axial)	$K_t = 2,5$	$k = 6,5$ $S_a = 190 \text{ MPa}$ $N = 528.820$	$k = 5,6$ $S_{a,D} = 190 \text{ MPa}$ $N_D = 577.810$	$k = 6,2$ $S_a = 160 \text{ MPa}$ $N = 602.970$	$k = 6,1$ $S_{a,D} = 160 \text{ MPa}$ $N_D = 658.180$
	$K_t = 3,6$	$k = 5,9$ $S_a = 155 \text{ MPa}$ $N = 252.470$	$k = 4,7$ $S_{a,D} = 155 \text{ MPa}$ $N_D = 385.200$	$k = 5,7$ $S_a = 125 \text{ MPa}$ $N = 312.350$	$k = 5,0$ $S_{a,D} = 125 \text{ MPa}$ $N_D = 358.580$

Tab. 14 Kennwerte der Wöhlerversuche ($P_U = 50\%$); Metasafe 900

		Lebensdauerversuche (kraftgesteuert)			
		CARLOS-V0		CARLOS-V1	
		$\bar{R} = -0,64$	$\bar{R} = -0,64$	$\bar{R} = -1$	$\bar{R} = -1$
		Anriß	Bruch	Anriß	Bruch
Planbiegung	$K_t = 1,5$	$\bar{k} = 7,3$ $\bar{S}_a = 371 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,0$ $\bar{S}_a = 431 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,6$ $\bar{S}_a = 406 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,3$ $\bar{S}_a = 472 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
	$K_t = 2,2$	$\bar{k} = 7,7$ $\bar{S}_a = 305 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,5$ $\bar{S}_a = 341 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 7,1$ $\bar{S}_a = 287 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,2$ $\bar{S}_a = 360 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
Zug-Druck (axial)	$K_t = 2,5$	$\bar{k} = 5,9$ $\bar{S}_a = 258 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,8$ $\bar{S}_a = 274 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,4$ $\bar{S}_a = 279 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,2$ $\bar{S}_a = 301 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
	$K_t = 3,6$	$\bar{k} = 6,1$ $\bar{S}_a = 199 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,1$ $\bar{S}_a = 208 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,0$ $\bar{S}_a = 198 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,1$ $\bar{S}_a = 223 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$

Tab. 15 Kennwerte der Lebensdauerversuche ($P_U = 50\%$); Metasafe 900; (Teil 1)

		Lebensdauerversuche (kraftgesteuert)			
		CARLOS-V2		CARLOS-V3	
		$\bar{R} = -0,63$	$\bar{R} = -0,63$	$\bar{R} = -0,53$	$\bar{R} = -0,53$
		Anriß	Bruch	Anriß	Bruch
Planbiegung	$K_t = 1,5$	$\bar{k} = 4,6$ $\bar{S}_a = 366 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,5$ $\bar{S}_a = 504 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,5$ $\bar{S}_a = 409 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,6$ $\bar{S}_a = 516 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
	$K_t = 2,2$	$\bar{k} = 5,1$ $\bar{S}_a = 321 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,9$ $\bar{S}_a = 467 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,9$ $\bar{S}_a = 240 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,1$ $\bar{S}_a = 383 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
Zug-Druck (axial)	$K_t = 2,5$	$\bar{k} = 7,3$ $\bar{S}_a = 343 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,6$ $\bar{S}_a = 359 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,9$ $\bar{S}_a = 295 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,5$ $\bar{S}_a = 305 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
	$K_t = 3,6$	$\bar{k} = 6,7$ $\bar{S}_a = 291 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,3$ $\bar{S}_a = 312 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,3$ $\bar{S}_a = 245 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 6,2$ $\bar{S}_a = 266 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$

Tab. 15 Kennwerte der Lebensdauerversuche ($P_{\bar{U}} = 50\%$); Metasafe 900; (Teil 2)

Zug-Druck (axial) $K_t = 3,6$	Lebensdauerversuche (kraftgesteuert)			
	Lastfolge LF1		Lastfolge LF3	
	Anriß	Bruch	Anriß	Bruch
$\bar{R} = -1$	$\bar{k} = 6,1$ $\bar{S}_a = 181 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,2$ $\bar{S}_a = 202 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 4,2$ $\bar{S}_a = 199 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 3,8$ $\bar{S}_a = 211 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$
$\bar{R} = 0$	$\bar{k} = 6,0$ $\bar{S}_a = 143 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$	$\bar{k} = 5,4$ $\bar{S}_a = 145 \text{ MPa}$ $\bar{N} = 10^7$		

Tab. 15 Kennwerte der Lebensdauerversuche ($P_{\bar{U}} = 50\%$); Metasafe 900; (Teil 3)

	Unabhängige	Koeffizient		t	P(t)
		b	Standardfehler		
AlCuMg2 Bruch $R^2 = 0,7865$ $R^2_{\text{kor}} = 0,7477$	Konstante	8,6870	0,5750	15,1071	1,0574E-08
	K_t	-0,4454	0,2176	-2,0465	0,0654
	χ^*	2,3152	0,4772	4,8517	0,0005
Metasafe 900 Anriß $R^2 = 0,7126$ $R^2_{\text{kor}} = 0,6048$	Konstante	3,3018	1,7537	1,8827	0,0965
	K_t	-0,8253	0,1962	-4,2064	0,0030
	χ^*	-2,3320	0,6713	-3,4735	0,0084
	$\bar{k}_{\text{Bruch PU= 50\%}}$	0,5999	0,2561	2,3423	0,0472
Metasafe 900 Bruch $R^2 = 0,6888$ $R^2_{\text{kor}} = 0,6410$	Konstante	6,6792	0,4798	13,9206	3,4561E-09
	K_t	0,3299	0,1864	1,7699	0,1002
	χ^*	2,1052	0,3927	5,3615	0,0001

Tab. 16 Neigungsexponenten \bar{k} der CARLOS-Lebensdauerlinien - Statistik der Regressionsparameter

	Ausfallkriterium Anriß		Ausfallkriterium Bruch	
	AlCuMg2	Metasafe 900	AlCuMg2	Metasafe 900
$K_t = 1,5$	-	6,97	6,73	5,99
$K_t = 2,2$	6,53	7,42	4,49	4,48
$K_t = 2,5$	7,32	6,38	6,12	6,21
$K_t = 3,6$	6,00	6,27	4,66	5,57

Tab. 17 Neigungsexponenten \bar{k} der CARLOS-Lebensdauerlinien für die Lebensdauerrechnungen

CARLOS-V0		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	335	1,0000E+06	1,650E+06	1,189E+06	6,840E+05
	2	279	3,4613E+06	4,394E+06	2,971E+06	1,709E+06
	3	246	8,000E+06	8,774E+06	5,629E+06	3,238E+06
2,19	1	288	1,0000E+06	9,432E+05	7,033E+05	5,087E+05
	2	204	4,7073E+06	5,338E+06	4,660E+06	3,371E+06
	3	181	8,0000E+06	1,002E+07	9,218E+06	6,667E+06
2,53	1	204	6,0000E+05	1,517E+06	1,314E+06	5,247E+05
	2	188	1,0000E+06	2,312E+06	2,218E+06	8,856E+05
	3	162	2,4336E+06	4,799E+06	5,601E+06	2,236E+06
	4	134	8,0000E+06	1,333E+07	1,951E+07	7,790E+06
3,48	1	182	6,000E+05	9,095E+05	8,737E+05	3,708E+05
	2	163	1,000E+06	1,700E+06	1,691E+06	7,177E+05
	3	146	1,6741E+06	3,229E+06	3,318E+06	1,408E+06
	4	104	8,0000E+06	2,431E+07	2,760E+07	1,171E+07

Tab. 18 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, CARLOS-V0

CARLOS-V1		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	344	9,4608E+05	1,928E+06	1,846E+06	1,199E+06
	2	341	1,0000E+06	2,000E+06	1,930E+06	1,253E+06
	3	250	8,0000E+06	1,114E+07	1,039E+07	6,747E+06
2,19	1	293	1,0000E+06	1,336E+06	1,293E+06	1,056E+06
	2	247	2,1842E+06	3,434E+06	3,383E+06	2,763E+06
	3	185	8,0000E+06	1,926E+07	1,953E+07	1,595E+07
2,53	1	206	6,0000 E+05	2,735E+06	2,609E+06	1,176E+06
	2	189	1,0000 E+06	4,540E+06	4,532E+06	2,043E+06
	3	175	1,5874 E+06	7,299E+06	7,486E+06	3,375E+06
	4	135	8,0000 E+06	4,001E+07	4,453E+07	2,007E+07
3,48	1	190	6,0000 E+05	1,329E+06	1,329E+06	6,369E+05
	2	175	8,7952 E+05	2,172E+06	2,197E+06	1,053E+06
	3	171	1,0000 E+06	2,499E+06	2,532E+06	1,213E+06
	4	109	8,0000 E+06	4,709E+07	4,953E+07	2,373E+07

Tab. 19 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, CARLOS-V1

CARLOS-V2		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL) \bar{N}_R [SP]	HAIGH (1WL, M) \bar{N}_R [SP]	HAIGH (1WL, M) \bar{N}_R [SP]
1,49	1	375	1,0000E+06	5,732E+06	4,354E+06	1,575E+06
	2	312	3,4366 E+06	1,603E+07	1,167E+07	4,221E+06
	3	275	8,0000 E+06	3,335E+07	2,359E+07	8,533E+06
2,19	1	342	1,0000 E+06	2,294E+06	1,884E+06	8,568E+05
	2	288	2,1420 E+06	5,788E+06	5,032E+06	2,289E+06
	3	215	8,0000 E+0	3,005E+07	2,809E+07	1,278E+07
2,53	1	262	6,0000 E+05	2,573E+06	2,036E+06	5,112E+05
	2	241	1,0000 E+05	3,927E+06	3,416E+06	8,578E+05
	3	194	3,7824 E+06	1,275E+07	1,391E+07	3,493E+06
	4	172	8,0000 E+06	2,533E+07	3,079E+07	7,731E+06
3,48	1	244	6,0000 E+05	1,152E+06	1,081E+06	2,885E+05
	2	219	1,0000 E+06	2,138E+06	2,053E+06	5,479E+05
	3	170	3,2107 E+06	9,683E+06	9,782E+06	2,611E+06
	4	140	8,0000 E+06	3,247E+07	3,425E+07	9,141E+06

Tab. 20 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, CARLOS-V2

CARLOS-V3		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL) \bar{N}_R [SP]	HAIGH (1WL, M) \bar{N}_R [SP]	HAIGH (1WL, M) \bar{N}_R [SP]
1,49	1	380	1,0000 E+06	1,635E+06	1,288E+06	8,948E+05
	2	299	5,0341 E+06	5,691E+06	4,058E+06	2,819E+06
	3	279	8,0000 E+06	8,141E+06	5,659E+06	3,931E+06
2,19	1	315	1,0000 E+06	1,224E+06	7,681E+05	6,709E+05
	2	252	2,7332 E+06	3,640E+06	2,573E+06	2,247E+06
	3	198	8,0000 E+06	1,174E+07	9,455E+06	8,258E+06
2,53	1	231	6,0000 E+05	1,688E+06	9,689E+05	4,671E+05
	2	213	1,0000 E+06	2,498E+06	1,617E+06	7,796E+05
	3	182	2,5917 E+06	5,307E+06	4,276E+06	2,061E+06
	4	151	8,0000 E+06	1,278E+07	1,362E+07	6,566E+06
3,48	1	208	6,0000 E+05	7,516E+05	6,529E+05	3,346E+05
	2	186	1,0000 E+06	1,417E+06	1,276E+06	6,540E+05
	3	157	2,2165 E+06	3,683E+06	3,523E+06	1,806E+06
	4	119	8,0000 E+06	1,749E+07	1,837E+07	9,415E+06

Tab. 21 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, CARLOS-V3

LF1-1		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	300	8,9542 E+05	1,942E+06	3,942E+06	1,417E+06
	2	246	2,8412 E+06	6,432E+06	6,555E+06	4,710E+06
	3	185	1,4782 E+07	4,952E+07	8,659E+06	3,673E+07
2,19	1	230	1,5713 E+06	2,994E+06	3,085E+06	2,748E+06
	2	198	3,8692 E+06	7,038E+06	7,269E+06	6,476E+06
	3	170	9,9324 E+06	1,826E+07	1,895E+07	1,688E+07
2,53	1	190	5,7327 E+05	3,234E+06	3,171E+06	1,963E+06
	2	159	2,3344 E+06	1,203E+07	1,214E+07	7,517E+06
	3	130	1,1491 E+07	6,439E+07	6,794E+07	4,207E+07
3,48	1	200	2,2661 E+05	5,322E+05	5,140E+05	2,766E+05
	2	140	1,5910 E+06	4,641E+06	4,640E+06	2,497E+06
	3	100	1,0255 E+07	5,123E+07	5,021E+07	2,702E+07

Tab. 22 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, LF1-1

LF1-0		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	170	2,3212 E+06	3,942E+06	1,990E+06	1,462E+06
	2	156	3,2992 E+06	6,555E+06	3,312E+06	2,434E+06
	3	150	3,9760 E+06	8,659E+06	4,190E+06	3,079E+06
2,19	1	172	4,3248 E+05	7,092E+05	7,369E+05	6,565E+05
	2	130	1,8272 E+06	2,601E+06	3,230E+06	2,878E+06
	3	97	8,0283 E+06	1,417E+07	1,916E+07	1,707E+07
2,53	1	150	2,7359 E+05	5,460E+05	3,541E+05	2,193E+05
	2	122	7,2491 E+05	1,345E+06	1,474E+06	9,127E+05
	3	90	2,8692 E+06	7,190E+06	1,447E+07	8,960E+06
3,48	1	100	6,5707 E+05	1,759E+06	2,289E+06	1,232E+06
	2	86	1,7842 E+06	4,110E+06	5,994E+06	3,226E+06
	3	70	6,9178 E+06	1,501E+07	2,544E+07	1,369E+07

Tab. 23 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, LF1-0

LF2		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	260	1,1272 E+06	6,318E+06	3,416E+06	1,103E+06
	2	242	1,9931 E+06	9,642E+06	5,189E+06	1,675E+06
	3	220	4,2184 E+06	1,845E+07	9,382E+06	3,029E+06
2,19	1	200	1,1065 E+06	4,505E+06	5,378E+06	2,104E+06
	2	178	1,7692 E+06	8,412E+06	1,050E+07	4,109E+06
	3	155	3,5991 E+06	2,311E+07	2,993E+07	1,171E+07
2,53	1	165	7,0896 E+05	4,365E+06	5,388E+06	1,466E+06
	2	138	2,6378 E+06	1,205E+07	2,061E+07	5,606E+06
	3	113	1,1674 E+07	5,429E+07	1,170E+08	3,182E+07

Tab. 24 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, LF2

LF3		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	260	3,3047 E+06	3,458E+07	1,907E+07	5,977E+06
	2	239	5,6234 E+06	6,144E+07	3,469E+07	1,087E+07
	3	220	9,6262 E+06	1,047E+08	6,356E+07	1,992E+07
2,19	1	200	2,1378 E+06	2,214E+07	2,792E+07	1,061E+07
	2	172	6,0066 E+06	5,964E+07	7,893E+07	2,999E+07
	3	150	1,5561 E+07	1,653E+08	2,135E+08	8,113E+07
2,53	1	220	6,0556 E+05	3,691E+06	4,240E+06	1,120E+06
	2	174	1,8712 E+06	1,461E+07	2,414E+07	6,375E+06
	3	140	5,5463 E+06	8,657E+07	1,455E+08	3,843E+07
3,48	1	150	1,4524 E+06	1,399E+07	1,897E+07	4,356E+06
	2	117	4,5891 E+06	7,544E+07	1,102E+08	2,530E+07
	3	100	9,3780 E+06	2,523E+08	3,409E+08	7,827E+07

Tab. 25 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, LF3

LF4		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K_t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,53	1	240	2,6174 E+05	1,184E+06	1,140E+06	3,011E+05
	2	187	7,8347 E+05	4,666E+06	6,858E+06	1,811E+06
	3	140	2,8044 E+06	4,323E+07	7,198E+07	1,901E+07

Tab. 26 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, LF4

LF6		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K_t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	200	9,8867 E+05	3,565E+06	3,820E+06	1,517E+06
	2	173	1,9151 E+06	7,356E+06	8,441E+06	3,353E+06
	3	150	3,7134 E+06	1,626E+07	1,938E+07	7,698E+06
2,53	1	165	5,7237 E+05	3,147E+06	2,829E+06	7,808E+05
	2	134	2,2431 E+06	1,035E+07	1,256E+07	3,467E+06
	3	113	6,7037 E+06	3,169E+07	4,547E+07	1,255E+07

Tab. 27 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, LF6

LF7		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K_t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	200	1,0917 E+06	4,674E+06	5,716E+06	2,135E+06
	2	178	2,5375 E+06	8,780E+06	1,122E+07	4,192E+06
	3	150	8,9160 E+06	2,448E+07	3,250E+07	1,214E+07
2,53	1	180	7,0809 E+05	2,981E+06	3,411E+06	8,855E+05
	2	148	2,5476 E+06	8,416E+06	1,453E+07	3,772E+06
	3	120	1,0287 E+07	3,676E+07	8,695E+07	2,257E+07

Tab. 28 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, AlCuMg2, LF7

CARLOS-V0		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	564	2,0000 E+06	3,816E+06	4,319E+06	1,797E+06
	2	485	4,9321 E+06	8,663E+06	9,550E+06	3,974E+06
	3	431	1,0000 E+07	1,672E+07	1,818E+07	7,565E+06
2,19	1	487	2,0000 E+06	2,955E+06	3,689E+06	2,165E+06
	2	454	2,7180 E+06	4,027E+06	5,055E+06	2,966E+06
	3	340	1,0000 E+07	1,551E+07	1,992E+07	1,169E+07
2,53	1	492	3,0000 E+05	1,050E+06	1,068E+06	3,386E+05
	2	388	1,3199 E+06	4,488E+06	4,352E+06	1,380E+06
	3	362	2,0000 E+06	6,968E+06	6,664E+06	2,112E+06
	4	280	1,0000 E+07	3,835E+07	3,529E+07	1,119E+07
3,48	1	404	3,0000 E+05	8,787E+05	1,028E+06	3,411E+05
	2	306	1,4050 E+06	3,809E+06	4,360E+06	1,447E+06
	3	287	2,0000 E+06	5,412E+06	6,187E+06	2,053E+06
	4	215	1,0000 E+07	2,988E+07	3,412E+07	1,132E+07

Tab. 29 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, CARLOS-V0

CARLOS-V1		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	611	2,0000 E+06	3,545E+06	3,562E+06	1,727E+06
	2	580	2,7365 E+06	4,704E+06	4,706E+06	2,281E+06
	3	467	1,0000 E+07	1,635E+07	1,629E+07	7,897E+06
2,19	1	526	2,0000 E+06	2,781E+06	2,853E+06	1,951E+06
	2	490	2,7330 E+06	3,851E+06	3,959E+06	2,707E+06
	3	367	1,0000 E+07	1,620E+07	1,679E+07	1,148E+07
2,53	1	528	3,0000 E+05	1,013E+06	1,006E+06	3,716E+05
	2	436	9,8266 E+05	3,248E+06	3,215E+06	1,188E+06
	3	389	2,0000 E+06	6,808E+06	6,699E+06	2,475E+06
	4	300	1,0000 E+07	4,411E+07	4,315E+07	1,594E+07
3,48	1	436	3,0000 E+05	8,471E+05	8,573E+05	3,313E+05
	2	355	9,4614 E+05	2,533E+06	2,564E+06	9,910E+05
	3	310	2,0000 E+06	5,544E+06	5,600E+06	2,164E+06
	4	232	1,0000 E+07	3,689E+07	3,728E+07	1,441E+07

Tab. 30 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, CARLOS-V1

CARLOS-V2		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	667	2,0000 E+06	1,153E+07	1,208E+07	3,068E+06
	2	587	4,2937 E+06	2,379E+07	2,483E+07	6,307E+06
	3	510	1,0000 E+07	5,383E+07	5,591E+07	1,420E+07
2,19	1	657	2,0000 E+06	4,463E+06	4,930E+06	1,766E+06
	2	566	3,8809 E+06	9,072E+06	1,013E+07	3,629E+06
	3	458	1,0000 E+07	2,622E+07	2,979E+07	1,067E+07
2,53	1	627	3,0000 E+05	1,797E+06	1,828E+06	3,537E+05
	2	462	2,0000 E+06	1,181E+07	1,181E+07	2,285E+06
	3	399	4,9371 E+06	3,007E+07	2,990E+07	5,786E+06
	4	356	1,0000 E+07	6,299E+07	6,220E+07	1,204E+07
3,48	1	571	3,0000 E+05	1,008E+06	1,081E+06	2,189E+05
	2	406	2,0000 E+06	6,378E+06	6,812E+06	1,379E+06
	3	382	2,8037 E+06	8,974E+06	9,592E+06	1,942E+06
	4	304	1,0000 E+07	3,415E+07	3,624E+07	7,339E+06

Tab. 31 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, CARLOS-V2

CARLOS-V3		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	670	2,0000 E+06	3,215E+06	4,051E+06	1,809E+06
	2	544	6,9814 E+06	9,421E+06	1,123E+07	5,014E+06
	3	512	1,0000 E+07	1,290E+07	1,516E+07	6,769E+06
2,19	1	555	2,0000 E+06	3,970E+06	5,165E+06	3,252E+06
	2	436	5,9005 E+06	1,107E+07	1,451E+07	9,135E+06
	3	387	1,0000 E+07	1,855E+07	2,443E+07	1,538E+07
2,53	1	546	3,0000 E+05	1,084E+06	1,162E+06	3,953E+05
	2	403	2,0000 E+06	6,557E+06	6,558E+06	2,231E+06
	3	367	3,5270 E+06	1,149E+07	1,128E+07	3,837E+06
	4	311	1,0000 E+07	3,184E+07	3,017E+07	1,026E+07
3,48	1	486	3,0000 E+05	7,367E+05	9,249E+05	3,293E+05
	2	346	2,0000 E+06	4,023E+06	4,846E+06	1,725E+06
	3	325	2,8242 E+06	5,522E+06	6,598E+06	2,349E+06
	4	259	1,0000 E+07	1,804E+07	2,100E+07	7,476E+06

Tab. 32 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, CARLOS-V3

LF1-1		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K_t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	600	8,4901 E+05	1,732E+06	1,697E+06	9,924E+05
	2	537	1,7617 E+06	3,179E+06	3,142E+06	1,837E+06
	3	450	5,6690 E+06	9,428E+06	9,284E+06	5,429E+06
2,19	1	606	6,7249 E+05	7,445E+05	7,517E+05	6,335E+05
	2	462	2,8667 E+06	2,531E+06	2,544E+06	2,144E+06
	3	300	2,9963 E+07	2,736E+07	2,759E+07	2,325E+07
2,53	1	400	8,3987 E+05	2,519E+06	2,511E+06	1,068E+06
	2	320	5,4303 E+06	1,216E+07	1,222E+07	5,198E+06
	3	280	1,680,3 E+07	3,597E+07	3,605E+07	1,534E+07
3,48	1	230	5,1061 E+06	1,751E+07	1,732E+07	7,442E+06
	2	333	7,4399 E+05	1,628E+06	1,622E+06	6,970E+05
	3	500	9,0039 E+04	2,002E+05	1,987E+05	8,538E+04

Tab. 33 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, LF1-1

LF1-0		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K_t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	350	9,4406 E+05	1,480E+06	3,157E+06	2,660E+06
	2	324	1,817 6E+06	2,129E+06	4,656E+06	3,924E+06
	3	300	3,4998 E+06	3,159E+06	7,026E+06	5,921E+06
2,53	1	280	1,0380 E+06	7,609E+06	6,122E+06	2,604E+06
	2	265	2,3619 E+06	1,200E+07	9,258E+06	3,938E+06
	3	250	5,4918 E+06	1,987E+07	1,465E+07	6,232E+06
3,48	1	300	1,9787 E+05	5,282E+05	7,821E+05	3,361E+05
	2	229	8,4942 E+05	2,515E+06	3,616E+06	1,554E+06
	3	180	3,1215 E+06	1,301E+07	1,912E+07	8,216E+06

Tab. 34 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, LF1-0

LF2		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	477	4,0173 E+06	2,801E+07	3,058E+07	7,306E+06
	2	433	8,7861 E+06	5,442E+07	5,916E+07	1,413E+07
	3	375	2,8202 E+07	1,424E+08	1,547E+08	3,696E+07
2,19	1	477	1,5309 E+06	4,299E+06	8,134E+06	2,801E+06
	2	378	5,5618 E+06	1,465E+07	3,094E+07	1,065E+07
	3	300	2,0548 E+07	5,922E+07	1,289E+08	4,438E+07
2,53	1	255	1,0565 E+07	2,894E+08	2,755E+08	4,788E+07
	2	310	4,3566 E+06	7,713E+07	7,214E+07	1,254E+07
	3	390	1,5614 E+06	1,464E+07	1,352E+07	2,350E+06

Tab. 35 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, LF2

LF3		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	600	2,2882 E+06	2,733E+07	2,757E+07	6,380E+06
	2	526	4,6735 E+06	5,603E+07	5,771E+07	1,335E+07
	3	450	1,1134 E+07	1,320E+08	1,332E+08	3,082E+07
2,19	1	600	1,2640 E+06	5,932E+06	1,078E+07	3,594E+06
	2	490	2,9354 E+06	1,663E+07	3,171E+07	1,057E+07
	3	400	6,9397 E+06	5,333E+07	9,426E+07	3,143E+07
2,53	1	440	1,9350 E+06	1,757E+07	1,732E+07	2,915E+06
	2	386	2,9632 E+06	3,915E+07	3,823E+07	6,434E+06
	3	340	4,5311 E+06	8,175E+07	8,073E+07	1,359E+07
3,48	1	270	3,8905 E+06	7,529E+07	8,215E+07	1,397E+07
	2	348	1,4932 E+06	1,717E+07	2,024E+07	3,441E+06
	3	450	5,5844 E+05	3,776E+06	4,676E+06	7,949E+05

Tab. 36 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, LF3

LF4		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K_t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	600	7,5192 E+05	2,941E+06	5,473E+06	1,825E+06
	2	490	1,6757 E+06	8,262E+06	1,594E+07	5,316E+06
	3	400	3,8066 E+06	2,631E+07	4,724E+07	1,575E+07
2,53	1	440	9,2847 E+05	8,991E+06	8,548E+06	1,439E+06
	2	377	1,9666 E+06	2,252E+07	2,172E+07	3,655E+06
	3	320	4,4203 E+06	5,774E+07	5,657E+07	9,521E+06

Tab. 37 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, LF4

LF6		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K_t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	300	1,4249 E+07	3,169E+07	5,024E+07	1,758E+07
	2	374	3,5326 E+06	1,010E+07	1,723E+07	6,029E+06
	3	450	1,1077 E+06	4,066E+06	6,791E+06	2,376E+06
2,53	1	345	1,6506 E+06	9,640E+06	9,804E+06	1,731E+06
	2	314	2,2789 E+06	1,703E+07	1,715E+07	3,029E+06
	3	285	3,2214 E+06	3,063E+07	3,024E+07	5,340E+06

Tab. 38 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, LF6

LF7		Versuch (Bruch)		Rechnung ohne Anpassung		mit Anpassung
K_t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	HAIGH (2WL)	HAIGH (1WL, M)	HAIGH (1WL, M)
				\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	412	4,2301 E+06	9,795E+06	2,074E+07	6,788E+06
	2	447	3,0285 E+06	6,353E+06	1,280E+07	4,189E+06
	3	477	2,3543 E+06	4,551E+06	8,884E+06	2,908E+06
2,53	1	353	3,6822 E+06	5,434E+07	4,486E+07	7,411E+06
	2	326	6,2273 E+06	1,065E+08	8,898E+07	1,470E+07
	3	300	1,0775 E+07	2,244E+08	1,853E+08	3,061E+07

Tab. 39 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, NK, MM, Metasafe 900, LF7

	Unabhängige	Koeffizient		t	P(t)
		b	Standardfehler		
AlCuMg2 $R^2 = 0,5166$ $R^2_{\text{kor}} = 0,4648$ $F = 9,9738$ $P(F) = 0,0001$	Konstante	-1,3785	0,3575	-3,8562	0,0006
	χ^*	-0,2423	0,0859	-2,8222	0,0087
	$R_m / S_{D(R=-1)}$	-0,0707	0,0220	-3,2183	0,0033
	$e^{ MV_1 - MV_2 }$	1,0326	0,2592	3,9837	0,0004
Metasafe 900 $R^2 = 0,6905$ $R^2_{\text{kor}} = 0,6573$ $F = 20,8210$ $P(F) = 2,7067E-07$	Konstante	-1,5536	0,2766	-5,6173	5,1494E-06
	χ^*	-0,3453	0,0666	-5,1834	1,6801E-05
	$R_m / S_{D(R=-1)}$	-0,1312	0,0306	-4,2837	0,0002
	$e^{ MV_1 - MV_2 }$	1,1236	0,1978	5,6800	4,3445E-06

Tab. 40 angepaßte Minersumme - Statistik der Regressionsparameter

D _{Regr} ermittelt für:						
- Nennspannungskonzept, Ausfallkriterium Bruch						
- HAIGH-Schaubild Variante 1 aus zwei Wöhlerlinien und aus einer Wöhlerlinie mit geschätzter Mittelspannungsempfindlichkeit						
- MINER modifiziert (HAIBACH)						
	CARLOS-V0	CARLOS-V1	CARLOS-V2	CARLOS-V3		
e ^{MV₁-MV₂}	1,2827	1,3338	1,0876	1,3621		
χ* = -0,56 (K _t = 1,49); R _m /S _{D (R=-1)} = 4,5520 (R _m = 569 MPa, S _{D (R=-1)} = 125 MPa)						
D _{Regr}	0,5753	0,6494	0,3617	0,6947		
χ* = -1,39 (K _t = 2,19); R _m /S _{D (R=-1)} = 5,9895 (R _m = 569 MPa, S _{D (R=-1)} = 95 MPa)						
D _{Regr}	0,7233	0,8166	0,4548	0,8734		
χ* = -0,62 (K _t = 2,53); R _m /S _{D (R=-1)} = 7,0000 (R _m = 490 MPa, S _{D (R=-1)} = 70 MPa)						
D _{Regr}	0,3993	0,4508	0,2511	0,4821		
χ* = -1,07 (K _t = 3,48); R _m /S _{D (R=-1)} = 8,1667 (R _m = 490 MPa, S _{D (R=-1)} = 60 MPa)						
D _{Regr}	0,4244	0,4792	0,2669	0,5125		
	LF1	LF2	LF3	LF4	LF6	LF7
e ^{MV₁-MV₂}	1,3826	1,0367	1,0243	1,0243	1,0429	1,0171
χ* = -0,56 (K _t = 1,49); R _m /S _{D (R=-1)} = 4,5077 (R _m = 586 MPa, S _{D (R=-1)} = 130 MPa) *						
D _{Regr}	0,7348	0,3228	0,3134	0,3134	0,3276	0,3081
χ* = -1,39 (K _t = 2,19); R _m /S _{D (R=-1)} = 6,1684 (R _m = 586 MPa, S _{D (R=-1)} = 95 MPa) *						
D _{Regr}	0,8909	0,3913	0,3800	0,3800	0,3972	0,3736
χ* = -0,62 (K _t = 2,53); R _m /S _{D (R=-1)} = 5,7647 (R _m = 490 MPa, S _{D (R=-1)} = 85 MPa) **						
D _{Regr}	0,6192	0,2720	0,2641	0,2641	0,2760	0,2596
χ* = -1,07 (K _t = 3,48); R _m /S _{D (R=-1)} = 8,1667 (R _m = 490 MPa, S _{D (R=-1)} = 60 MPa)						
D _{Regr}	0,5382	0,2364	0,2296	0,2296	0,2400	0,2257

Tab. 41 Schädigungssummen D_{Regr} aus multipler Regression
CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, AlCuMg2

.. für Anpassung nicht verwendet, da keine Versuchsergebnisse vorhanden

* R_m und $S_{D(R=-1)}$ aus [BUXB95]

** $S_{D(R=-1)}$ aus [BUXB95]

D_{Regr} ermittelt für: - Nennspannungskonzept, Ausfallkriterium Bruch - HAIGH-Schaubild Variante 1 aus zwei Wöhlerlinien und aus einer Wöhlerlinie mit geschätzter Mittelspannungsempfindlichkeit - MINER modifiziert (HAIBACH)						
	CARLOS-V0	CARLOS-V1	CARLOS-V2	CARLOS-V3		
$e^{ MV_1 - MV_2 }$	1,2827	1,3418	1,0920	1,3100		
$\chi^* = -0,56$ ($K_t = 1,49$); $R_m/S_{D(R=-1)} = 3,5208$ ($R_m = 845$ MPa, $S_{D(R=-1)} = 240$ MPa)						
D_{Regr}	0,4161	0,4848	0,2540	0,4465		
$\chi^* = -1,39$ ($K_t = 2,19$); $R_m/S_{D(R=-1)} = 4,5676$ ($R_m = 845$ MPa, $S_{D(R=-1)} = 185$ MPa)						
D_{Regr}	0,5868	0,6837	0,3582	0,6296		
$\chi^* = -0,62$ ($K_t = 2,53$); $R_m/S_{D(R=-1)} = 4,5789$ ($R_m = 870$ MPa, $S_{D(R=-1)} = 190$ MPa)						
D_{Regr}	0,3170	0,3694	0,1935	0,3402		
$\chi^* = -1,07$ ($K_t = 3,48$); $R_m/S_{D(R=-1)} = 5,6129$ ($R_m = 870$ MPa, $S_{D(R=-1)} = 155$ MPa)						
D_{Regr}	0,3318	0,3865	0,2025	0,3560		
	LF1	LF2	LF3	LF4	LF6	LF7
$e^{ MV_1 - MV_2 }$	1,3826	1,0367	1,0243	1,0243	1,0429	1,0171
$\chi^* = -0,56$ ($K_t = 1,49$); $R_m/S_{D(R=-1)} = 3,250$ ($R_m = 845$ MPa, $S_{D(R=-1)} = 260$ MPa) *						
D_{Regr}	0,5848	0,2389	0,2314	0,2314	0,2428	0,2272
$\chi^* = -1,39$ ($K_t = 2,19$); $R_m/S_{D(R=-1)} = 4,2250$ ($R_m = 845$ MPa, $S_{D(R=-1)} = 200$ MPa) *						
D_{Regr}	0,8427	0,3443	0,3335	0,3335	0,3499	0,3273
$\chi^* = -0,62$ ($K_t = 2,53$); $R_m/S_{D(R=-1)} = 4,4615$ ($R_m = 870$ MPa, $S_{D(R=-1)} = 195$ MPa) *						
D_{Regr}	0,4254	0,1738	0,1683	0,1683	0,1766	0,1652
$\chi^* = -1,07$ ($K_t = 3,48$); $R_m/S_{D(R=-1)} = 5,6129$ ($R_m = 870$ MPa, $S_{D(R=-1)} = 155$ MPa)						
D_{Regr}	0,4297	0,1755	0,1700	0,1700	0,1784	0,1669

Tab. 42 Schädigungssummen D_{Regr} aus multipler Regression
CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, Metasafe 900

.. für Anpassung nicht verwendet, da keine Versuchsergebnisse vorhanden

* $S_{D(R=-1)}$ aus [BUXB95]

CARLOS-V0		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,53	1	204	2,5090E+05	3,749E+05 / 3,754E+05	8,769E+05
	2	188	4,5638E+05	5,729E+05 / 5,729E+05	1,325E+06
	3	162	1,3578E+06	1,131E+06 / 1,131E+06	2,583E+06
	4	134	5,4512E+06	2,310E+06 / 2,310E+06	5,028E+06
3,48	1	182	2,2161E+05	1,159E+05 / 1,159E+05	4,122E+05
	2	163	4,2942E+05	2,233E+05 / 2,231E+05	7,177E+05
	3	146	8,3156E+05	4,076E+05 / 4,079E+05	1,256E+06

Tab. 43 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, CARLOS-V0

CARLOS-V1		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	293	1,4764E+05	- / 1,132E+05	1,447E+05
	2	247	4,5059E+05	- / 4,371E+05	3,077E+05
	3	185	2,9777E+06	- / 4,040E+06	1,186E+06
2,53	1	206	2,0988E+05	2,808E+05 / 2,808E+05	5,898E+05
	2	189	3,9442E+05	4,640E+05 / 4,640E+05	8,777E+05
	3	175	6,9309E+05	7,330E+05 / 7,330E+05	1,242E+06
3,48	1	190	1,1320E+05	7,430E+04 / 7,430E+04	2,757E+05
	2	175	1,8542E+05	1,149E+05 / 1,149E+05	3,923E+05
	3	171	2,1301E+05	1,327E+05 / 1,327E+05	4,314E+05

Tab. 44 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, CARLOS-V1

CARLOS-V2		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	342	2,2290E+05	- / 1,073E+05	2,341E+05
	2	283	7,6809E+05	- / 7,496E+05	6,034E+05
2,53	1	241	4,1545E+05	7,043E+05 / 7,043E+05	9,909E+05
	2	194	2,0354E+06	3,052E+06 / 3,052E+06	3,470E+06
	3	172	4,9153E+06	6,474E+06 / 6,473E+06	6,829E+06
3,48	1	219	2,4758E+05	1,758E+05 / 1,758E+05	3,772E+05
	2	170	1,1316E+06	8,559E+05 / 8,597E+05	1,584E+06
	3	140	3,6276E+06	3,202E+06 / 3,201E+06	4,824E+06

Tab. 45 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, CARLOS-V2

CARLOS-V3		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	315	2,4637E+05	- / 8,305E+04	2,577E+05
	2	252	1,0586E+06	- / 5,379E+05	7,063E+05
	3	198	5,1168E+06	- / 1,601E+06	2,041E+06
2,53	1	231	2,6426E+05	3,488E+05 / 3,491E+05	9,427E+05
	2	213	4,7875E+05	5,585E+05 / 5,588E+05	1,430E+06
	3	182	1,5152E+06	1,301E+06 / 1,302E+06	3,128E+06
	4	151	5,9496E+06	2,862E+06 / 2,856E+06	7,142E+06
3,48	1	208	1,9794E+05	1,006E+05 / 1,006E+05	4,303E+05
	2	186	3,8710E+05	1,924E+05 / 1,924E+05	7,489E+05
	3	157	1,0703E+06	5,192E+05 / 5,192E+05	1,754E+06

Tab. 46 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, CARLOS-V3

LF1-1		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	300	2,9357E+05	- / 1,027E+06	5,137E+05
	2	247	1,1030E+06	- / 4,699E+06	1,314E+06
	3	185	7,8589E+06	- / 5,616E+07	9,078E+06
2,19	1	230	3,0175E+05	- / 4,148E+05	3,927E+05
	2	198	8,4206E+05	- / 1,298E+06	8,437E+05
	3	170	2,5038E+06	- / 4,235E+06	1,735E+06
2,53	1	190	2,9591E+05	2,350E+05 / 2,350E+05	7,906E+05
	2	159	1,5420E+06	6,940E+05 / 6,940E+05	1,880E+06
	3	130	1,0090E+06	2,721E+06 / 2,721E+06	3,523E+06
3,48	1	200	3,9827E+04	2,929E+04 / 2,929E+04	1,906E+05
	2	140	4,7955E+05	2,175E+05 / 2,175E+05	9,788E+05
	3	100	5,0978E+06	1,835E+06 / 1,835E+06	3,995E+06

Tab. 47 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, LF1-1

LF1-0		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	172	4,4814E+05	- / 3,434E+05	4,650E+05
	2	122	1,9029E+06	- / 1,242E+06	1,540E+06
	3	97	4,9681E+06	- / 6,699E+06	4,020E+06
2,53	1	150	2,3117E+05	3,039E+05 / 3,041E+05	1,323E+06
	2	122	6,1362E+05	5,186E+05 / 5,190E+05	2,496E+06
	3	90	2,5505E+06	1,402E+06 / 1,402E+06	4,303E+06
3,48	1	100	4,8659E+05	3,800E+05 / 3,797E+05	2,421E+06
	2	86	1,4221E+06	5,596E+05 / 5,595E+05	3,521E+06
	3	70	6,3454E+06	1,041E+06 / 1,041E+06	5,053E+06

Tab. 48 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, LF1-0

LF2		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	260	2,0183E+05	- / 2,334E+06	8,432E+05
	2	235	4,6434E+05	- / 4,763E+06	1,264E+06
	3	220	8,0753E+05	- / 7,979E+06	1,662E+06
2,19	1	200	3,4021E+05	- / 1,290E+06	7,377E+05
	2	173	7,4251E+05	- / 2,666E+06	1,278E+06
	3	150	1,6085E+06	- / 7,799E+06	2,286E+06
2,53	1	165	4,9635E+05	1,015E+06 / 1,015E+06	1,856E+06
	2	134	2,7831E+06	2,587E+06 / 2,581E+06	3,614E+06
	3	113	1,1491E+07	6,542E+06 / 6,543E+06	5,410E+06

Tab. 49 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, LF2

LF3		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	260	2,3301E+06	- / 1,299E+07	1,762E+06
	2	239	4,6048E+06	- / 2,578E+07	2,566E+06
	3	220	9,1684E+06	- / 5,304E+07	3,976E+06
2,19	1	200	7,6028E+05	- / 4,772E+06	1,550E+06
	2	172	3,3618E+06	- / 1,613E+07	2,736E+06
	3	150	1,2746E+07	- / 5,218E+07	5,465E+06
2,53	1	220	4,2985E+05	5,450E+05 / 5,450E+05	1,335E+06
	2	175	1,4815E+06	1,769E+06 / 1,769E+06	2,609E+06
	3	150	3,2724E+06	5,177E+06 / 5,178E+06	3,940E+06
3,48	1	150	6,9860E+05	7,341E+05 / 7,341E+05	2,126E+06
	2	117	2,9934E+06	3,124E+06 / 3,123E+06	4,409E+06
	3	100	7,3377E+06	1,049E+07 / 1,049E+07	6,697E+06

Tab. 50 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, LF3

LF4		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,53	1	240	1,5532E+05	1,861E+05 / 1,861E+05	5,267E+05
	2	178	7,4630E+05	7,966E+05 / 7,971E+05	2,272E+06
	3	140	2,5613E+06	4,660E+06 / 4,659E+06	7,876E+06

Tab. 51 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, LF4

LF6		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	200	3,8045E+05	- / 6,409E+05	4,084E+05
	2	173	6,6392E+05	- / 1,323E+06	7,163E+05
	3	150	1,1683E+06	- / 3,731E+06	1,287E+06
2,53	1	165	4,3078E+05	6,694E+05 / 6,695E+05	1,021E+06
	2	134	1,8331E+06	1,608E+06 / 1,604E+06	2,031E+06
	3	113	5,8702E+06	3,633E+06 / 3,633E+06	3,042E+06

Tab. 52 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, LF6

LF7		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	200	7,8420E+05	- / 1,585E+06	9,635E+05
	2	178	1,9397E+06	- / 2,808E+06	1,535E+06
	3	150	7,6110E+06	- / 9,859E+06	3,106E+06
2,53	1	180	5,9131E+05	8,407E+05 / 8,411E+05	1,694E+06
	2	148	2,1303E+06	1,851E+06 / 1,852E+06	3,670E+06
	3	120	8,9460E+06	5,016E+06 / 5,016E+06	6,352E+06

Tab. 53 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, AlCuMg2, LF7

CARLOS-V0		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	P _{SWT} , NEUBeinf. mit Entfestigung	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	564	4,9555E+05	- / 1,095E+06	1,036E+05	2,052E+06
	2	483	1,4607E+06	- / 4,105E+06	-	4,996E+06
	3	431	3,2321E+06	- / 1,191E+07	7,322E+05	9,943E+06
2,19	1	487	2,8258E+05	- / 1,840E+05	4,309E+04	6,817E+05
	2	449	5,1637E+05	- / 3,293E+05	5,378E+04	1,064E+06
	3	340	4,0657E+06	- / 3,026E+06	2,615E+05	5,085E+06
2,53	1	492	1,9835E+05	1,805E+04 / 1,048E+05	2,720E+04	1,945E+05
	2	388	9,0333E+05	2,846E+05 / 4,711E+05	6,098E+04	1,117E+06
	3	362	1,4066E+06	5,456E+05 / 7,597E+05	7,658E+04	1,736E+06
	4	280	7,2496E+06	5,154E+06 / 5,534E+06	2,971E+05	7,919E+06
3,48	1	404	1,2477E+05	3,096E+04 / 5,328E+04	1,656E+04	1,876E+05
	2	306	7,1211E+05	2,517E+05 / 2,753E+05	4,600E+04	9,890E+05
	3	287	1,0643E+06	3,922E+05 / 4,205E+05	5,606E+04	1,401E+06
	4	215	6,5089E+06	3,487E+06 / 3,520E+06	2,344E+05	7,008E+06

Tab. 54 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, CARLOS-V0

CARLOS-V1		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	P _{SWT} , NEUBeinf. mit Entfestigung	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	611	6,6083E+05	- / 1,042E+06	6,228E+04	8,582E+05
	2	575	1,0092E+06	- / 1,785E+06	8,458E+04	1,183E+06
	3	467	4,3047E+06	- / 1,367E+07	-	3,809E+06
2,19	1	526	1,3332E+05	- / 1,599E+05	2,570E+04	3,156E+05
	2	485	2,4346E+05	- / 2,929E+05	3,891E+04	4,812E+05
	3	367	1,9270E+06	- / 3,221E+06	-	2,077E+06
2,53	1	528	1,6960E+05	8,534E+03 / 8,441E+04	1,618E+04	1,047E+05
	2	436	5,7577E+05	1,216E+05 / 3,005E+05	3,621E+04	4,148E+05
	3	389	1,1926E+06	4,433E+05 / 7,037E+05	5,228E+04	8,021E+05
	4	300	6,2634E+06	5,808E+06 / 6,394E+06	-	3,395E+06
3,48	1	436	8,3151E+04	1,693E+04 / 3,821E+04	9,531E+03	9,961E+04
	2	355	3,0161E+05	1,096E+05 / 1,382E+05	2,134E+04	3,297E+05
	3	310	7,0549E+05	3,214E+05 / 3,552E+05	3,916E+04	6,520E+05
	4	232	4,3413E+06	3,581E+06 / 3,634E+06	6,559E+04	2,918E+06

Tab. 55 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, CARLOS-V1

CARLOS-V2		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	P _{SWT} , NEUBeinf. mit Entfestigung	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	667	4,5329E+05	- / 2,241E+06	1,312E+06	1,180E+06
	2	581	1,1868E+06	- / 5,976E+06	2,128E+06	3,014E+06
	3	510	2,9448E+06	- / 1,622E+07	1,057E+07	7,450E+06
2,19	1	657	1,8317E+05	- / 2,019E+05	1,705E+05	1,482E+05
	2	566	5,5377E+05	- / 5,177E+05	4,706E+05	3,591E+05
	3	458	2,6648E+06	- / 2,091E+06	1,355E+06	1,374E+06
2,53	1	462	1,3299E+06	9,175E+04 / 1,196E+06	7,311E+05	4,316E+05
	2	382	4,4771E+06	2,565E+06 / 4,013E+06	2,642E+05	1,894E+06
	3	356	7,0216E+06	4,822E+06 / 6,431E+06	2,145E+06	3,134E+06
3,48	1	406	1,1106E+06	2,012E+05 / 3,742E+05	2,251E+05	2,431E+05
	2	382	1,6272E+06	3,525E+05 / 5,415E+05	-	3,451E+05
	3	304	6,8121E+06	2,046E+06 / 2,241E+06	9,783E+05	1,422E+06

Tab. 56 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, CARLOS-V2

CARLOS-V3		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	P _{SWT} , NEUBeinf. mit Entfestigung	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	670	3,5524E+05	- / 5,016E+05	1,804E+05	1,409E+06
	2	518	2,1363E+06	- / 3,316E+06	-	6,524E+06
	3	512	2,3171E+06	- / 3,645E+06	-	7,032E+06
2,19	1	555	8,4476E+04	- / 1,446E+05	6,166E+04	5,221E+05
	2	429	5,7098E+05	- / 7,602E+05	1,781E+05	2,494E+06
	3	387	1,2265E+06	- / 1,604E+06	-	4,628E+06
2,53	1	403	1,4993E+06	3,598E+05 / 6,597E+05	-	1,403E+06
	2	367	2,7248E+06	8,281E+05 / 1,192E+06	2,173E+05	2,758E+06
	3	311	7,8413E+06	3,211E+06 / 3,696E+06	-	8,164E+06
3,48	1	486	1,3707E+05	1,215E+04 / 4,465E+04	1,905E+04	3,086E+04
	2	346	1,1536E+06	2,021E+05 / 2,508E+05	8,666E+04	7,244E+05
	3	325	1,7081E+06	3,058E+05 / 3,568E+05	1,605E+05	1,095E+06
	4	259	7,0885E+06	1,390E+06 / 1,441E+06	-	4,553E+06

Tab. 57 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, CARLOS-V3

LF1-1		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	600	2,2911E+05	- / 5,528E+05	7,898E+05
	2	537	6,0617E+05	- / 1,588E+06	1,478E+06
	3	450	2,9648E+06	- / 1,074E+07	4,200E+06
2,19	1	606	6,7632E+04	- / 2,492E+04	1,321E+05
	2	454	7,1732E+05	- / 2,196E+05	5,794E+05
	3	300	2,1579E+07	- / 1,365E+07	5,918E+06
2,53	1	400	4,3368E+05	1,390E+05 / 2,448E+05	5,905E+05
	2	318	4,2537E+06	1,480E+06 / 1,717E+06	2,096E+06
	3	280	1,4815E+07	5,669E+06 / 6,069E+06	4,434E+06
3,48	1	400	8,0596E+04	1,753E+04 / 2,757E+04	1,421E+05
	2	333	2,4440E+05	7,687E+04 / 8,976E+04	3,747E+05
	3	230	2,3569E+06	1,772E+06 / 1,800E+06	2,656E+06

Tab. 58 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, LF1-1

LF1-0		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	350	6,0956E+05	- / 6,457E+05	1,467E+06
	2	318	1,8264E+06	- / 1,503E+06	2,527E+06
	3	300	3,4263E+06	- / 2,543E+06	3,604E+06
2,53	1	280	9,2664E+05	8,810E+05 / 1,477E+06	2,206E+06
	2	265	2,1987E+06	1,533E+06 / 2,355E+06	3,154E+06
	3	250	5,3677E+06	2,870E+06 / 3,941E+06	4,663E+06
3,48	1	300	1,1746E+05	5,099E+04 / 7,913E+04	3,402E+05
	2	229	5,9599E+05	4,890E+05 / 5,669E+05	1,577E+06
	3	180	2,5176E+06	4,123E+06 / 4,311E+06	6,568E+06

Tab. 59 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, LF1-0

LF2		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	477	2,6607E+06	- / 1,129E+07	5,486E+06
	2	433	6,6921E+06	- / 2,494E+07	9,095E+06
	3	375	2,6796E+07	- / 9,019E+07	2,155E+06
2,19	1	477	1,0258E+06	- / 7,470E+05	9,565E+05
	2	378	4,1609E+06	- / 3,622E+06	3,231E+06
	3	300	1,6575E+07	- / 2,131E+07	1,032E+07
2,53	1	390	1,3729E+06	9,430E+05 1,596E+06	1,517E+06
	2	310	3,7650E+06	6,496E+06 7,275E+06	5,028E+06
	3	255	1,1625E+07	2,948E+07 3,047E+07	1,372E+07

Tab. 60 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, LF2

LF3		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
1,49	1	600	1,6408E+06	- / 2,847E+06	2,729E+06
	2	511	4,1904E+06	- / 8,715E+06	7,045E+06
	3	450	8,9575E+06	- / 2,402E+07	1,434E+07
2,19	1	600	4,9056E+05	- / 3,000E+05	2,795E+05
	2	490	1,5297E+06	- / 9,270E+05	1,069E+06
	3	400	4,7512E+06	- / 3,253E+06	3,832E+06
2,53	1	440	1,5308E+06	7,670E+05 1,311E+06	8,189E+05
	2	386	2,4352E+06	2,081E+06 2,700E+06	2,103E+06
	3	340	3,8727E+06	4,968E+06 5,574E+06	4,823E+06
3,48	1	450	3,2253E+05	1,240E+05 2,360E+05	9,320E+04
	2	348	9,5223E+05	7,524E+05 8,482E+05	7,293E+05
	3	270	2,7564E+06	3,237E+06 3,310E+06	3,550E+06

Tab. 61 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, LF3

LF4		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	600	3,9476E+05	- / 1,501E+05	2,230E+05
	2	490	1,0666E+06	- / 4,623E+05	9,990E+05
	3	400	2,8786E+06	- / 1,624E+06	4,274E+06
2,53	1	440	7,8913E+05	3,832E+05 6,553E+05	7,299E+05
	2	377	1,7181E+06	1,227E+06 1,516E+06	2,470E+06
	3	320	4,0040E+06	3,751E+06 4,058E+06	8,447E+06

Tab. 62 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, LF4

LF6		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	450	6,9079E+05	- / 2,600E+05	8,457E+05
	2	367	3,0743E+06	- / 1,063E+06	2,320E+06
	3	300	1,3881E+07	- / 5,438E+06	6,364E+06
2,53	1	345	1,3028E+06	6,748E+05 8,473E+05	1,693E+06
	2	314	1,9395E+06	1,383E+06 1,571E+06	2,803E+06
	3	285	2,9625E+06	2,900E+06 3,124E+06	4,622E+06

Tab. 63 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, LF6

LF7		Versuch (Anriß)		P _{SWT} und NEUBER-Regel erweitert / einfach	L-Prognose
K _t	Hor.	\bar{S}_a [MPa]	\bar{N}_V [SP]	\bar{N}_R [SP]	\bar{N}_R [SP]
2,19	1	477	1,8173E+06	- / 1,876E+06	1,445E+06
	2	447	2,3610E+06	- / 3,161E+06	1,986E+06
	3	412	3,3133E+06	- / 6,100E+06	2,856E+06
2,53	1	353	3,5367E+06	5,671E+06 8,098E+06	3,596E+06
	2	326	5,8926E+06	1,276E+07 1,547E+07	5,461E+06
	3	300	1,0018E+07	2,697E+07 3,040E+07	8,066E+06

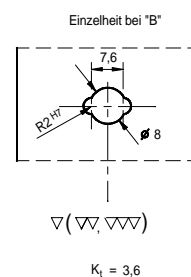
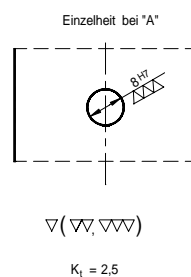
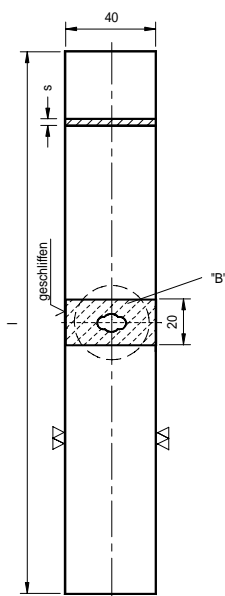
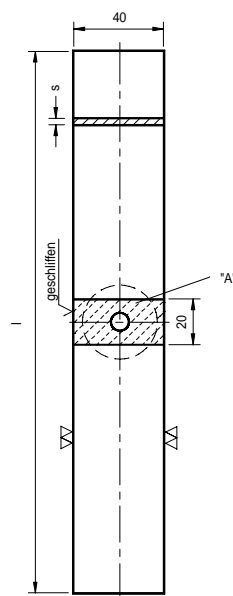
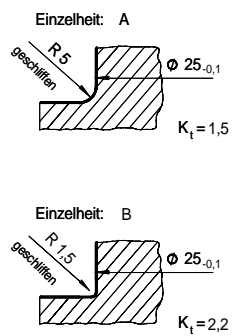
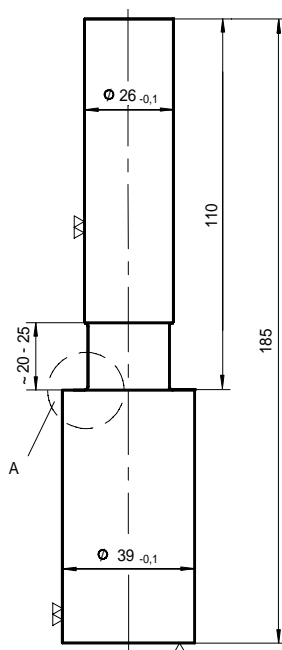
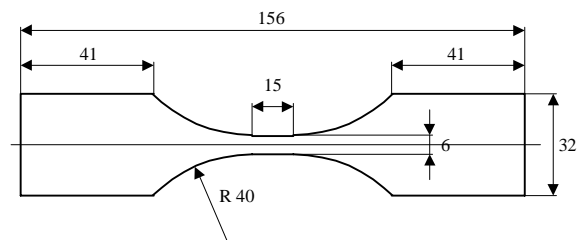
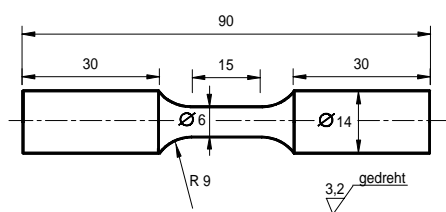
Tab. 64 Ergebnisse der Lebensdauerrechnung, ÖK, LP, OM, Metasafe 900, LF7

**Anlagen
(Abbildungen)
zur**

**Dissertationsschrift
„Werkstoff-, Geometrie- und Reihenfolgeeinflüsse
auf die Lebensdauer unter Betriebslasten“**

angenommen von der
Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

Dipl.-Ing. Matthias Müller
geb. am 11. Januar 1969 in Dresden



l (TUD) = 240mm ; l (LBF) = 400mm
s (Metasafe 900) = 5mm ; s (AlCuMg2) = 6mm

Abb. 1 Probenformen - ungekerbte Rund- und Flachprobe, abgesetzte Welle, gelochte Flachproben (nicht maßstäblich)

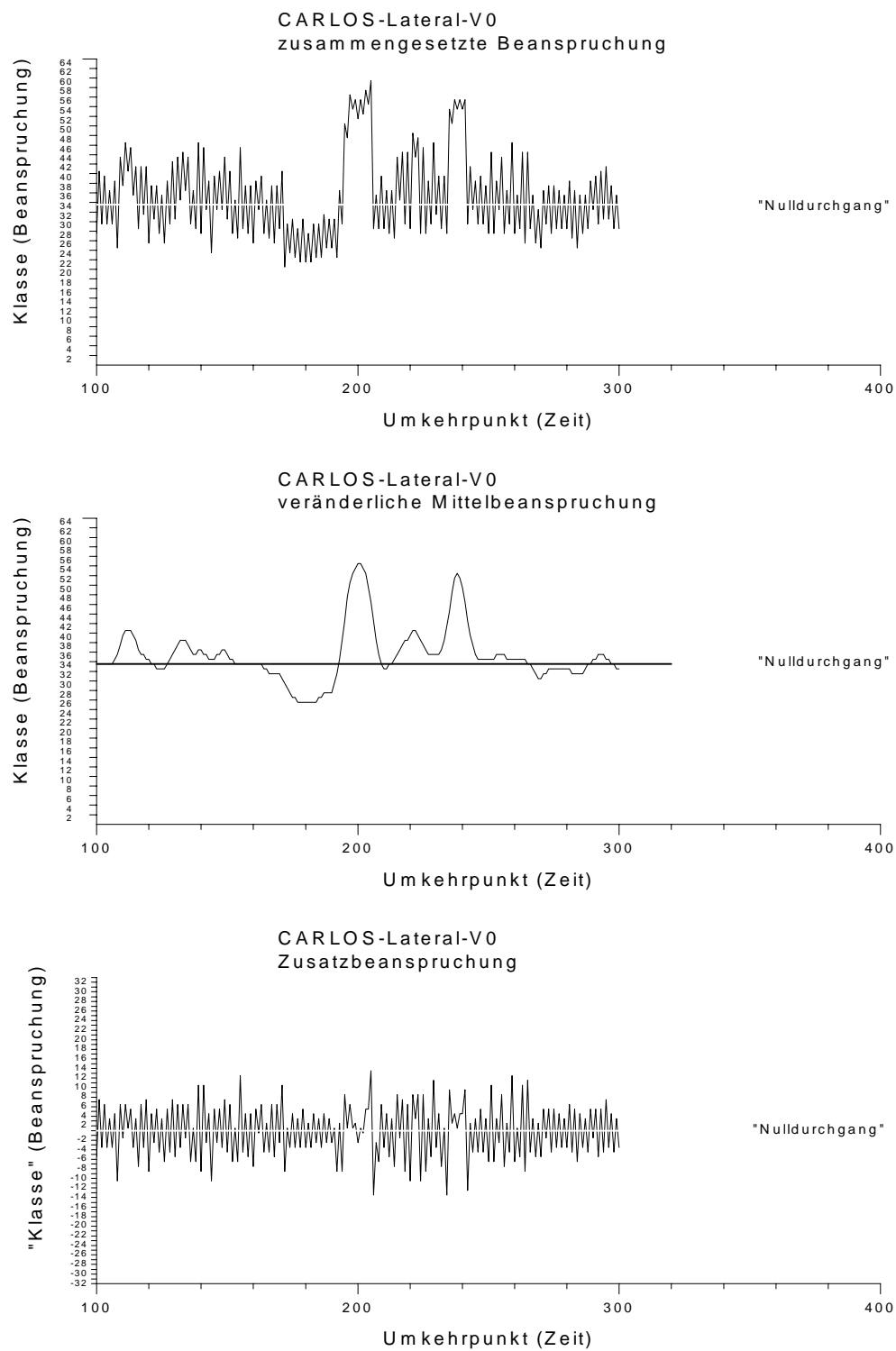


Abb. 2 Ausschnitt der Lastfolge CARLOS-V0 und ihrer Belastungsanteile

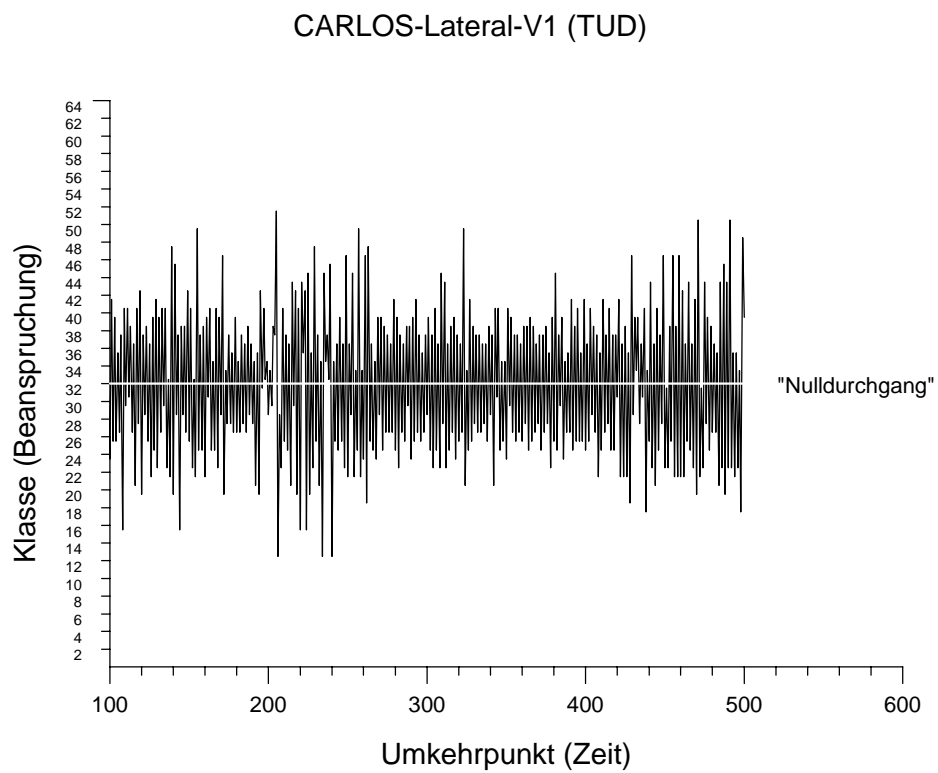


Abb. 3 Ausschnitt der Lastfolge CARLOS-V1 (TUD)

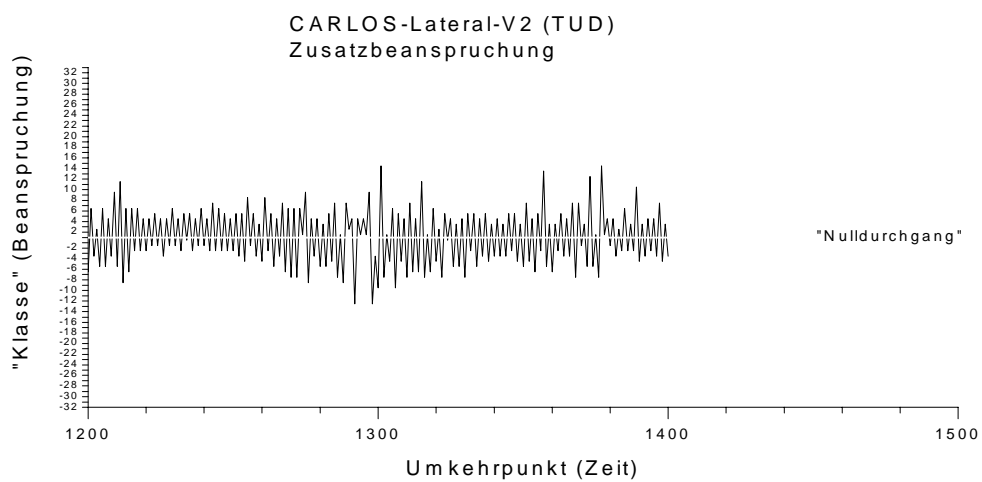
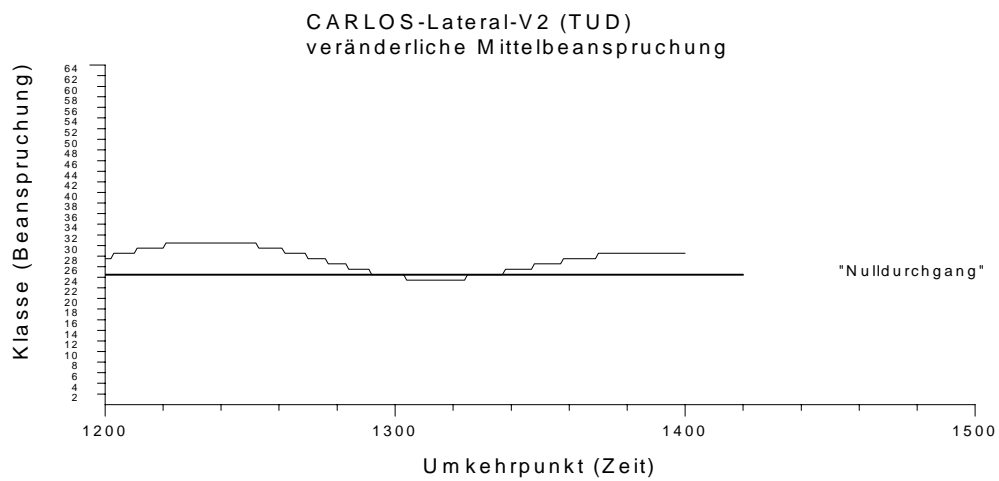
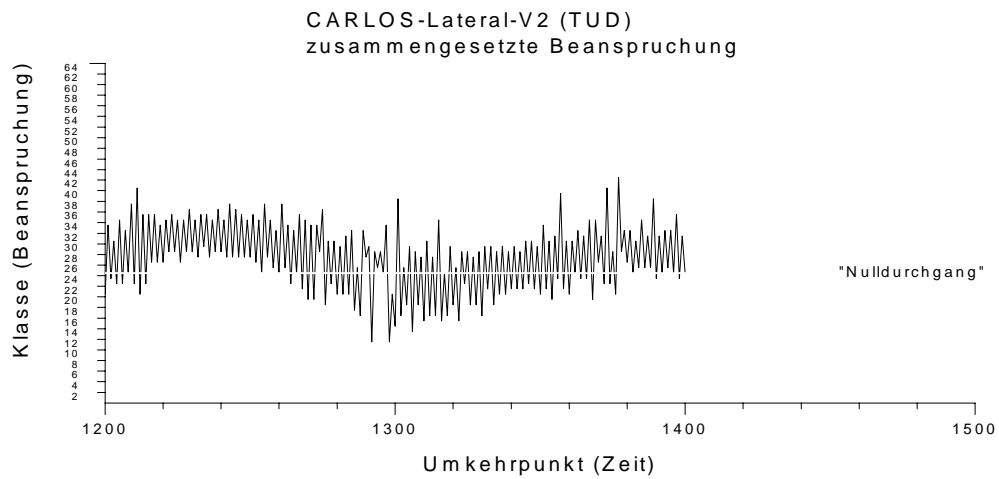


Abb. 4 Ausschnitt der Lastfolge CARLOS-V2 (TUD) und ihrer Belastungsanteile

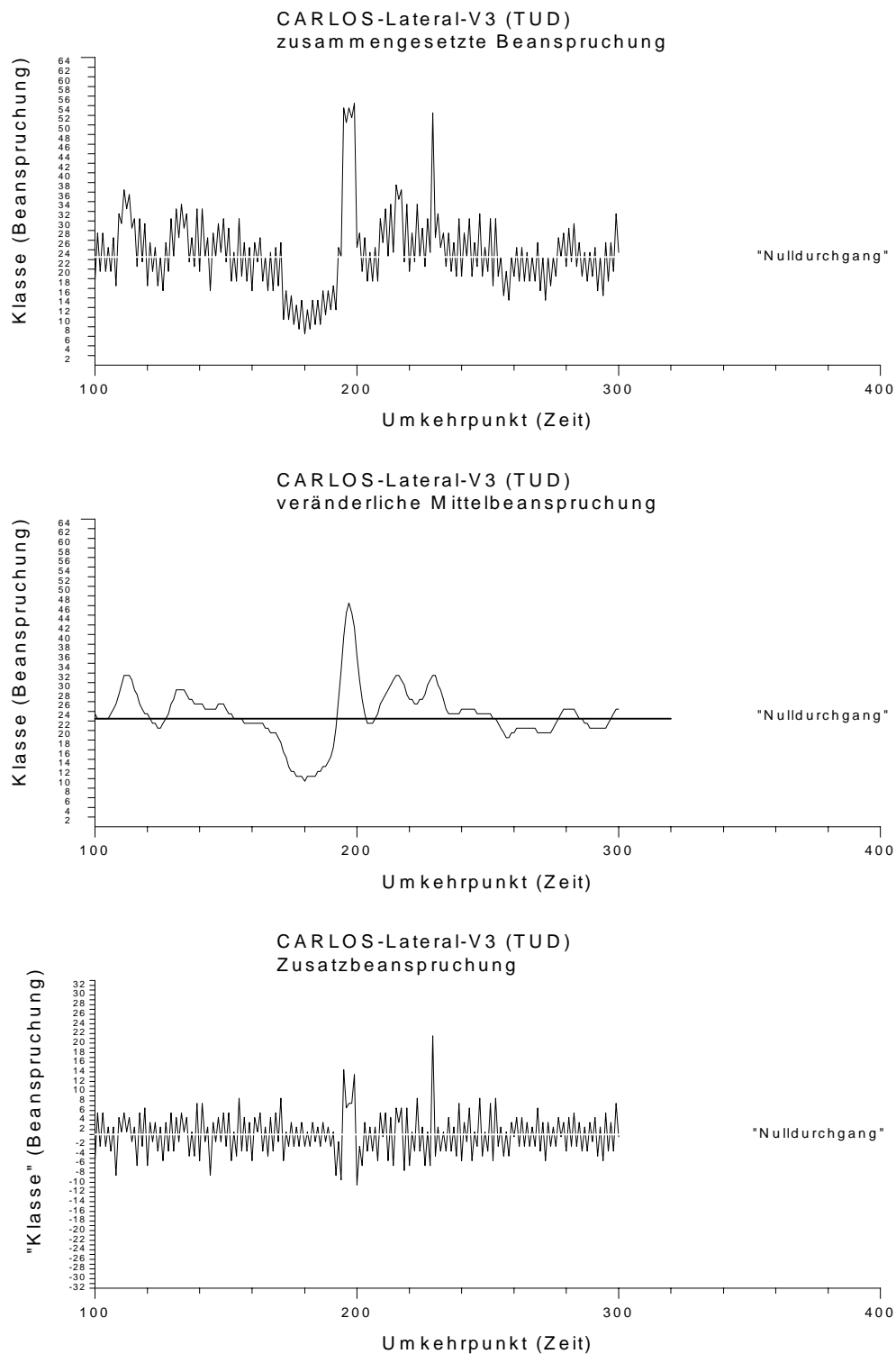


Abb. 5 Ausschnitt der Lastfolge CARLOS-V3 (TUD) und ihrer Belastungsanteile

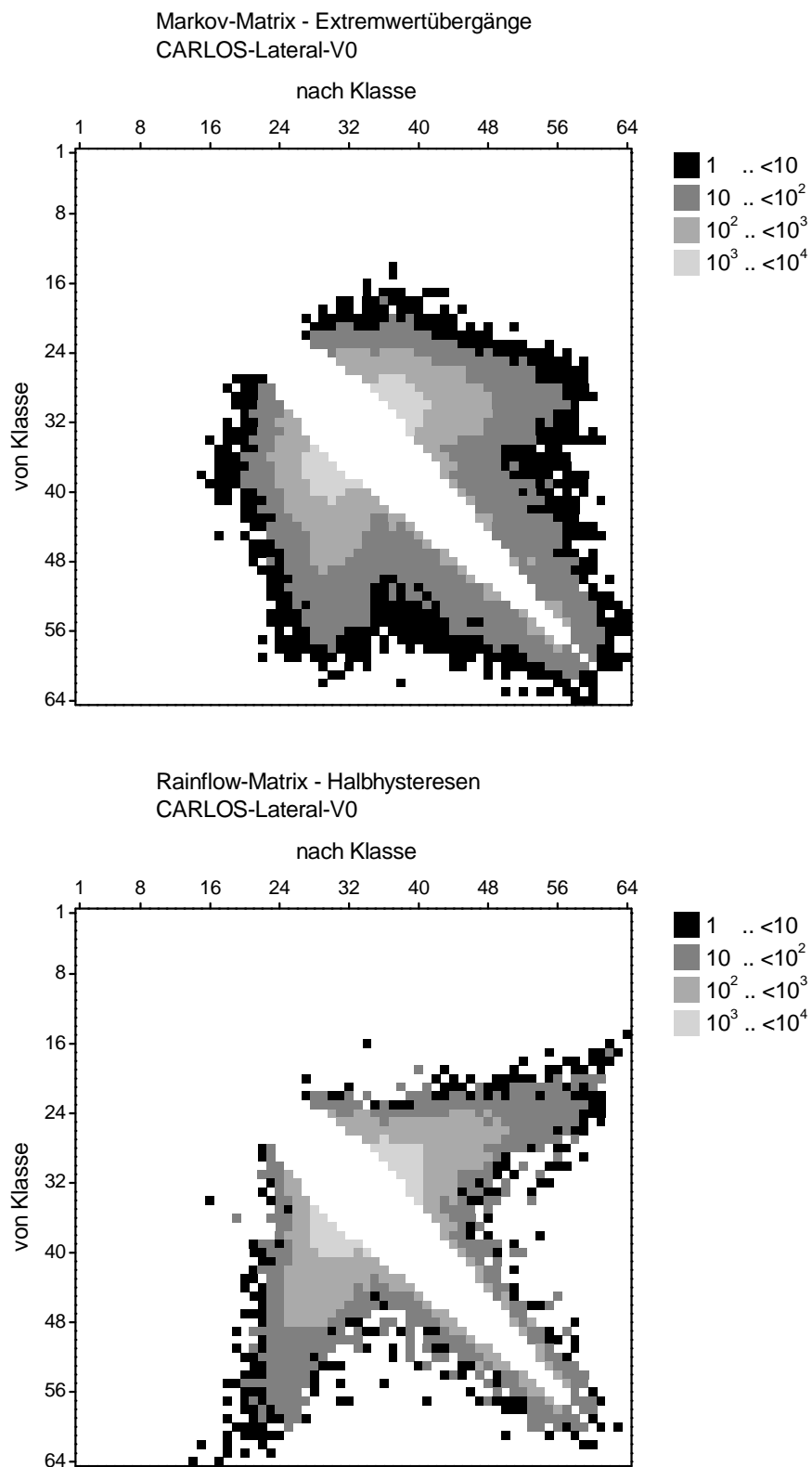


Abb. 6 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V0

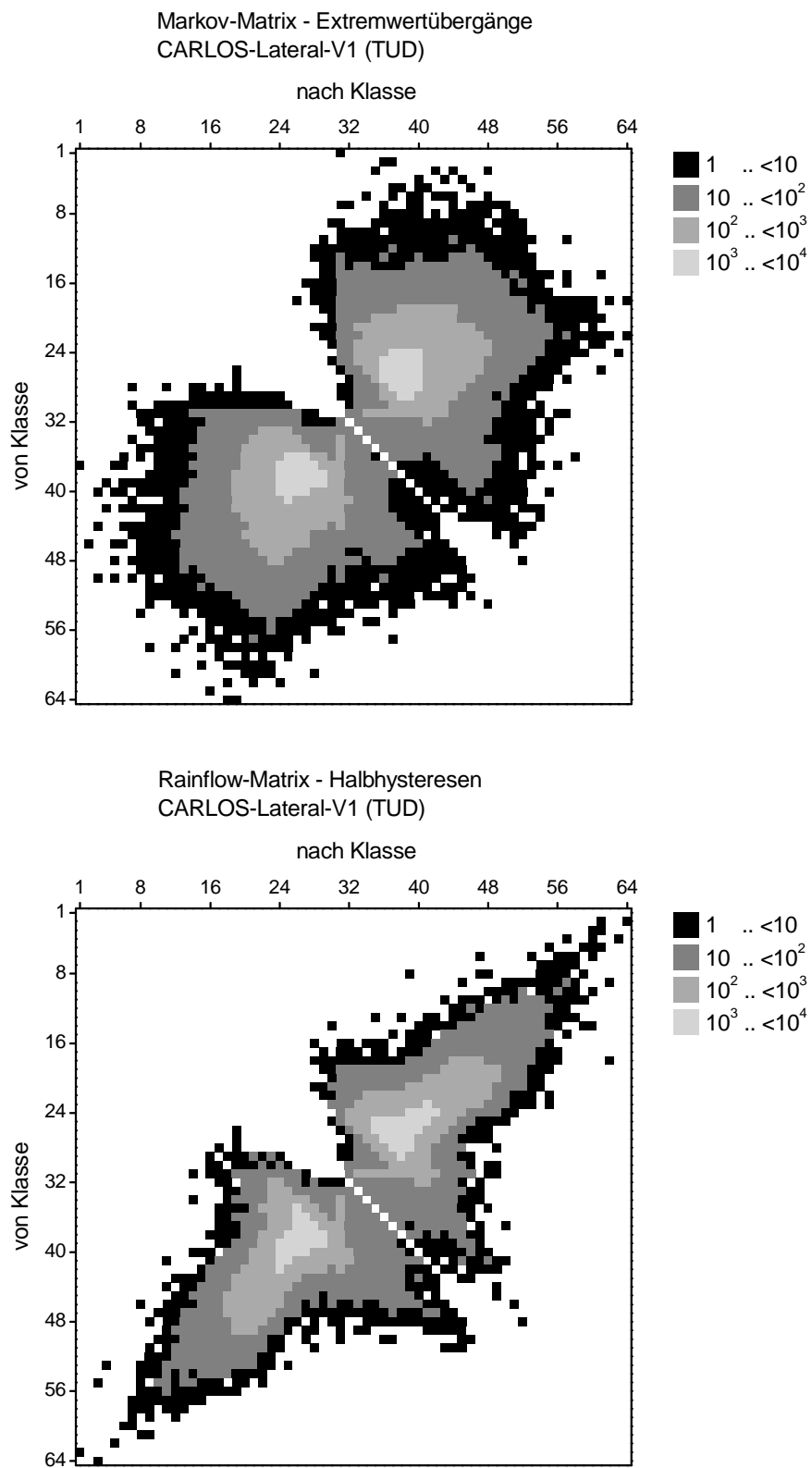


Abb. 7 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V1 (TUD)

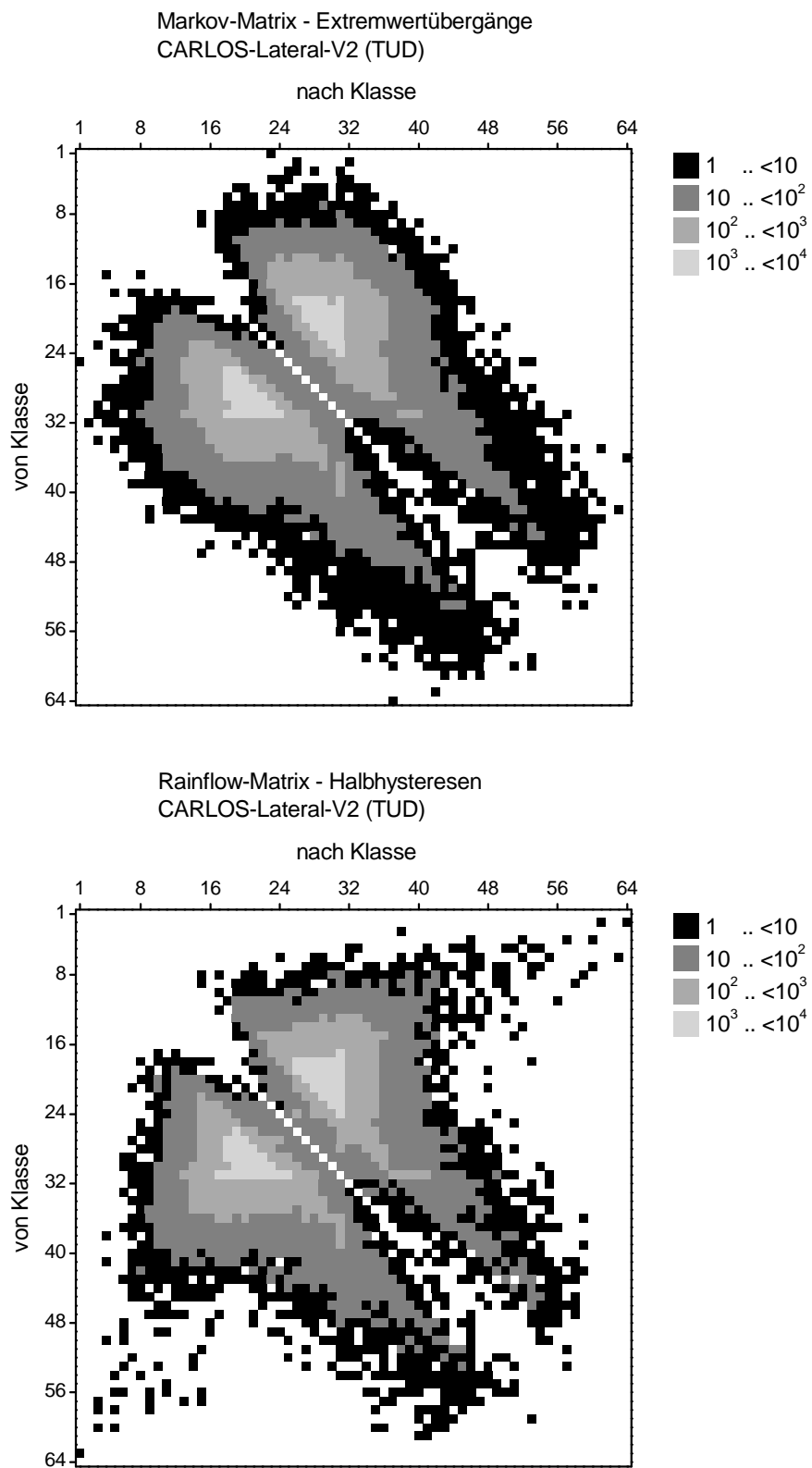


Abb. 8 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V2 (TUD)

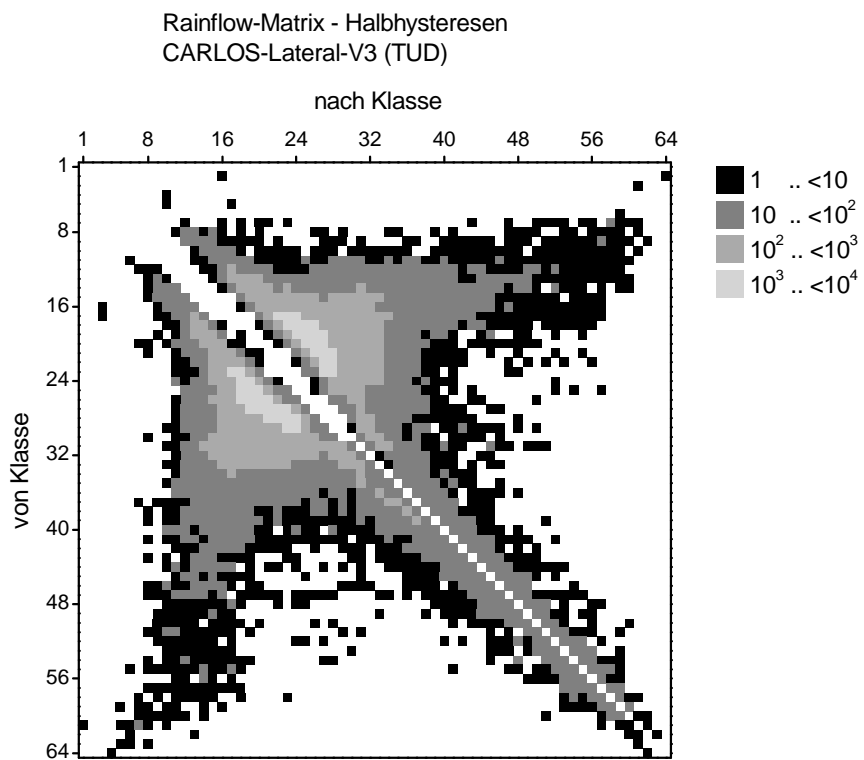
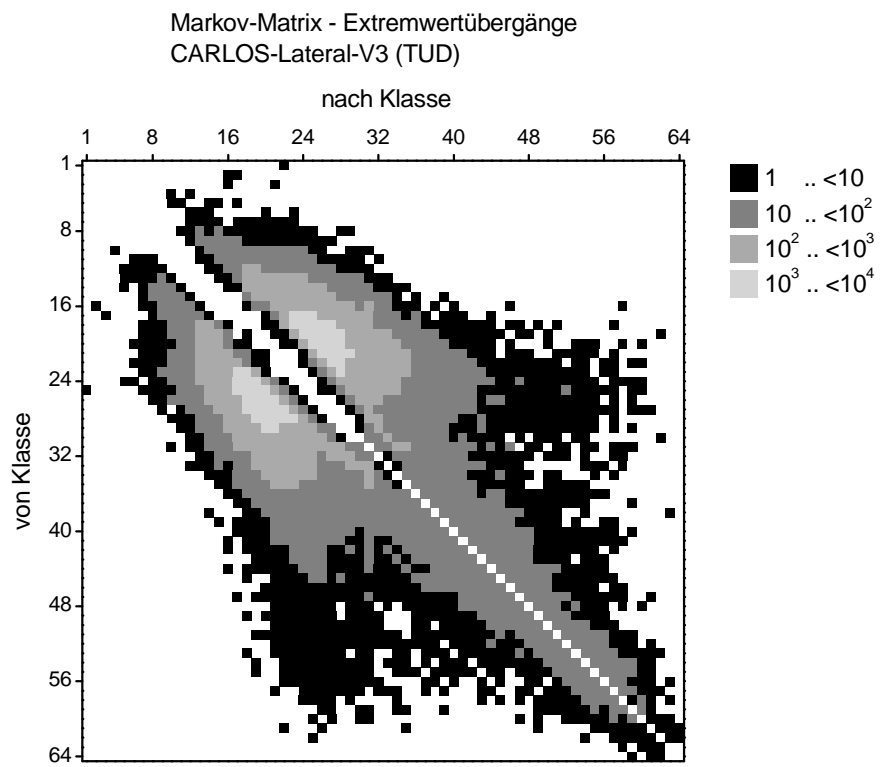


Abb. 9 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V3 (TUD)

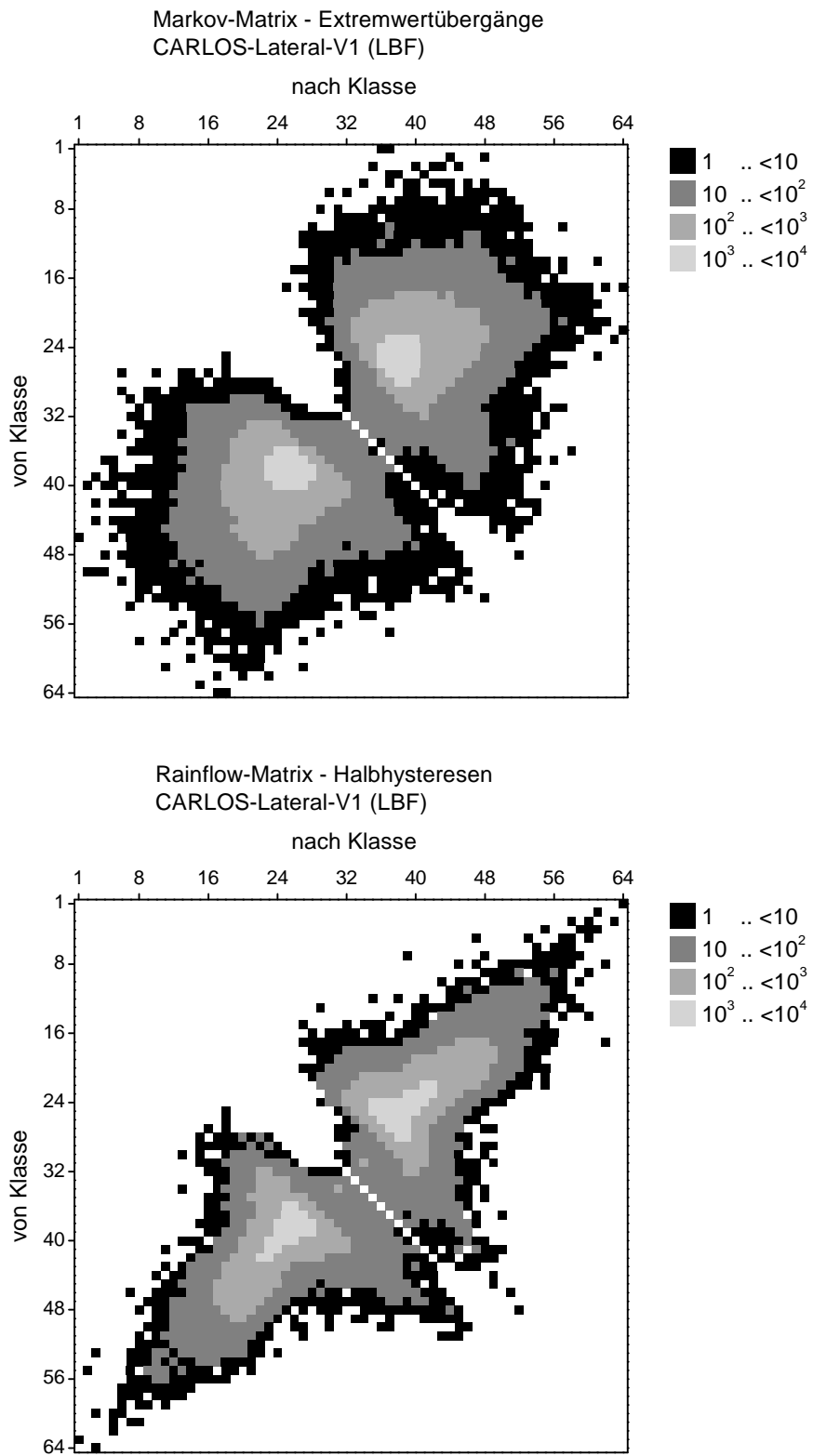


Abb. 10 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V1 (LBF)

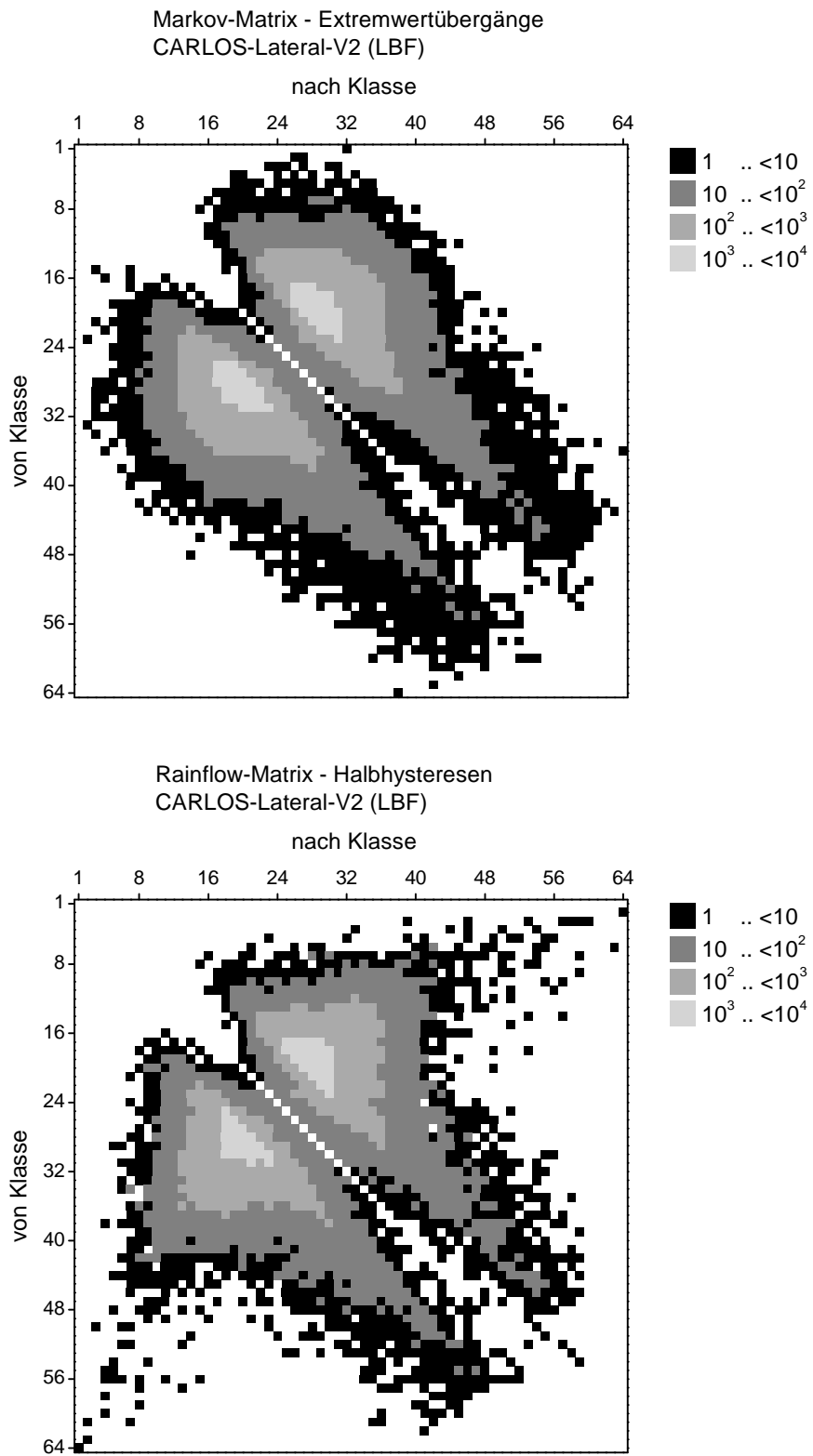


Abb. 11 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V2 (LBF)

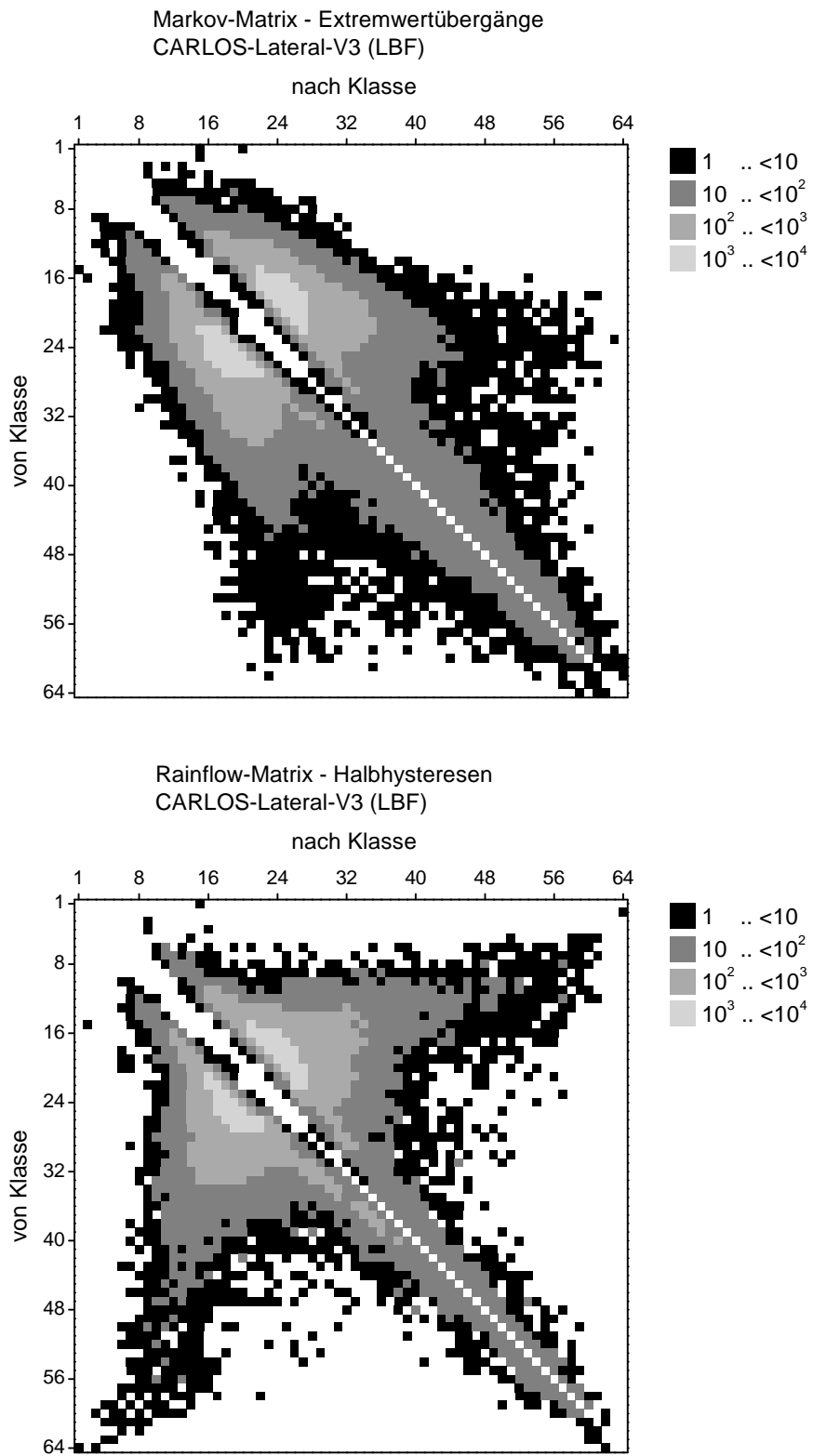


Abb. 12 Markov- und Rainflow-Matrix der Lastfolge CARLOS-V3 (LBF)

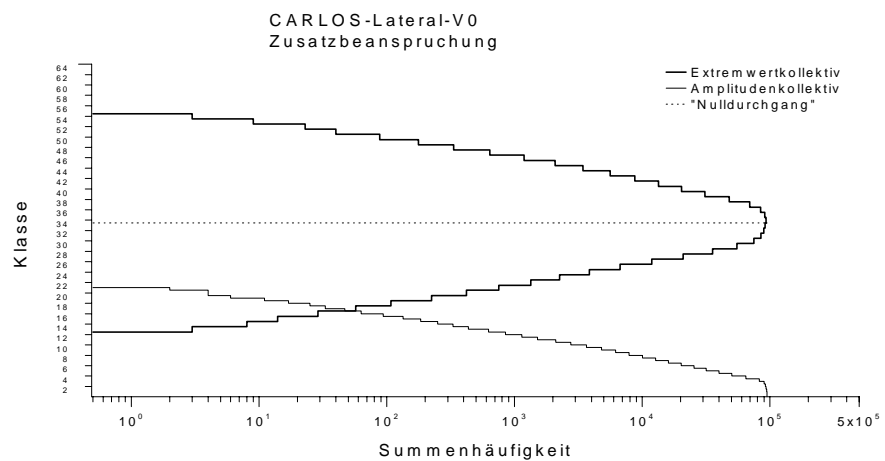
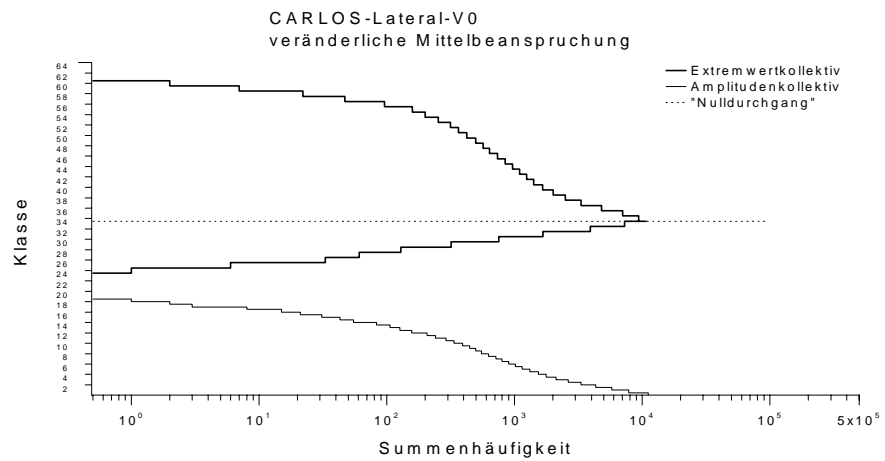
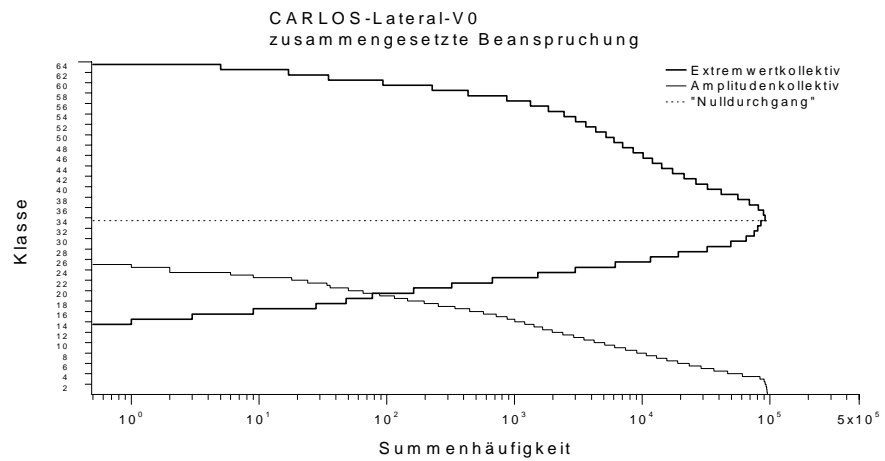


Abb. 13 Extremwert- und Amplitudenkollektive der Lastfolge CARLOS-V0 und ihrer Belastungsanteile

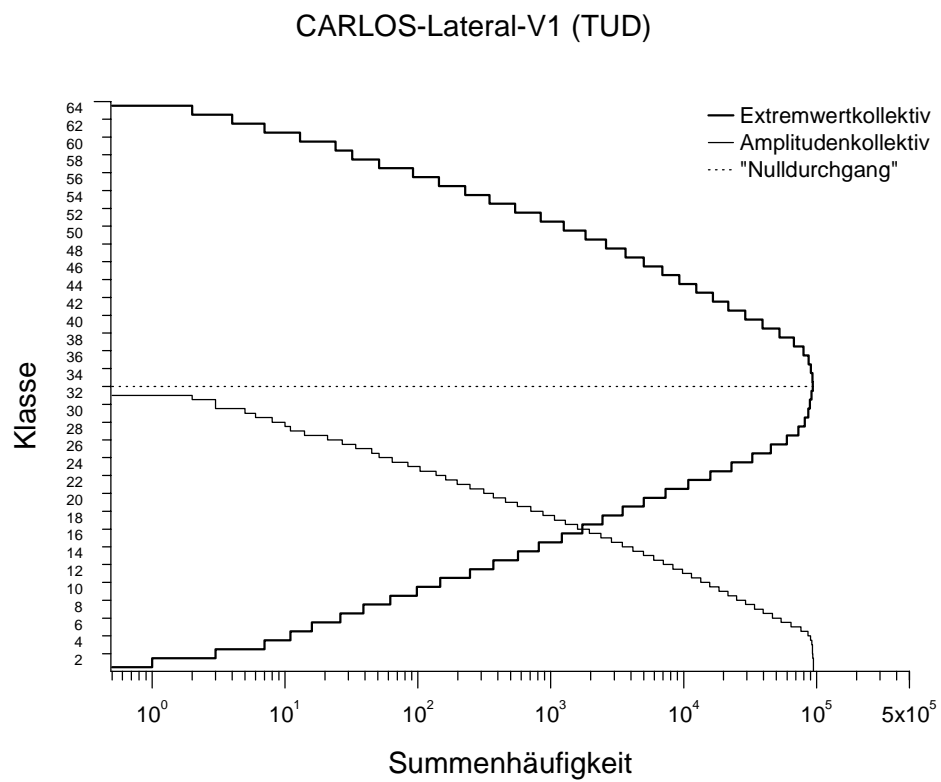


Abb. 14 Extremwert- und Amplitudenkollektiv der Lastfolge CARLOS-V1 (TUD)

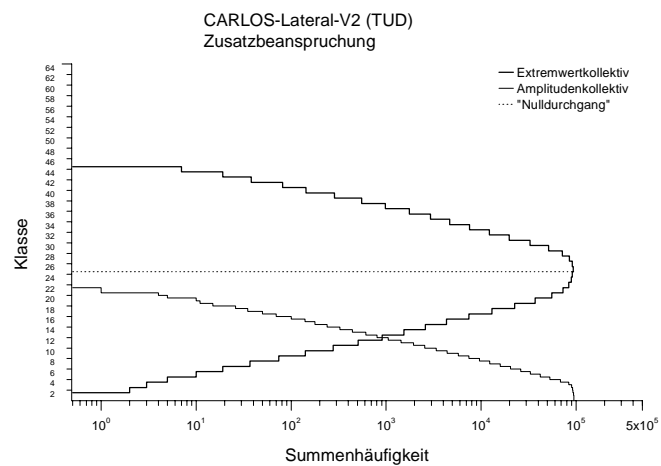
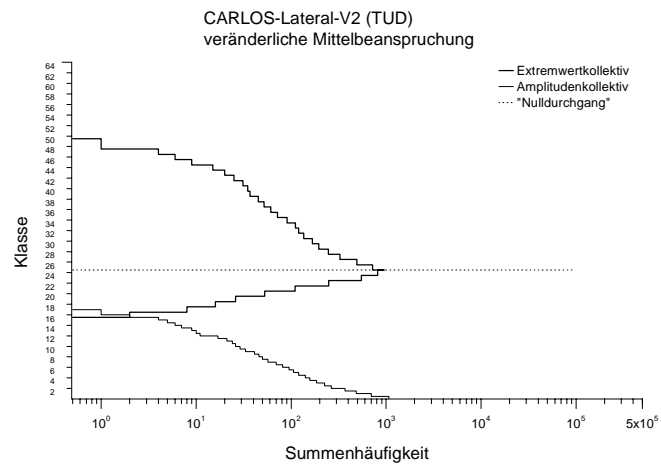
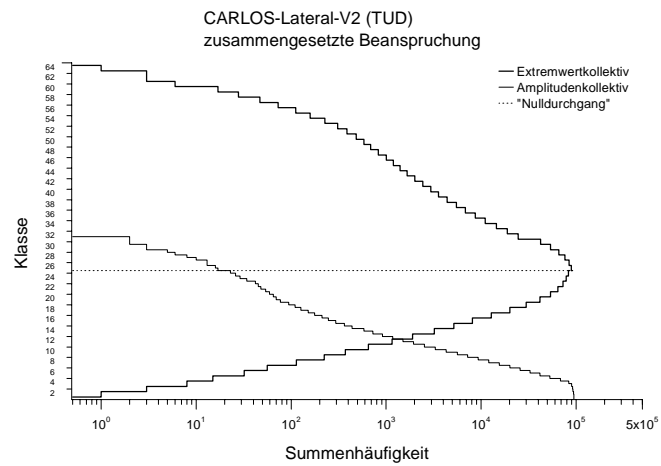


Abb. 15 Extremwert- und Amplitudenkollektive der Lastfolge CARLOS-V2 (TUD) und ihrer Belastungsanteile

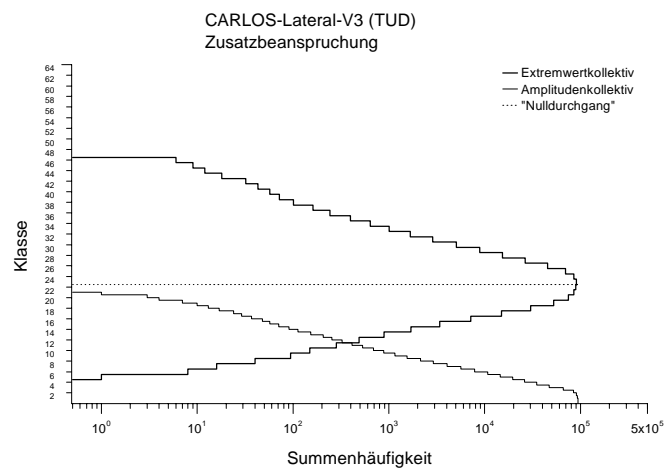
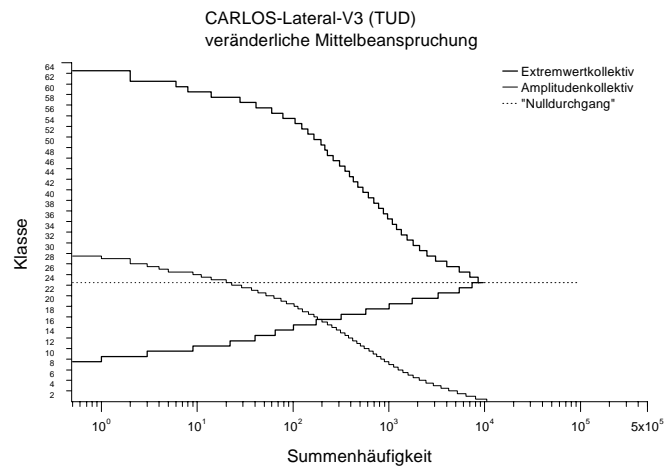
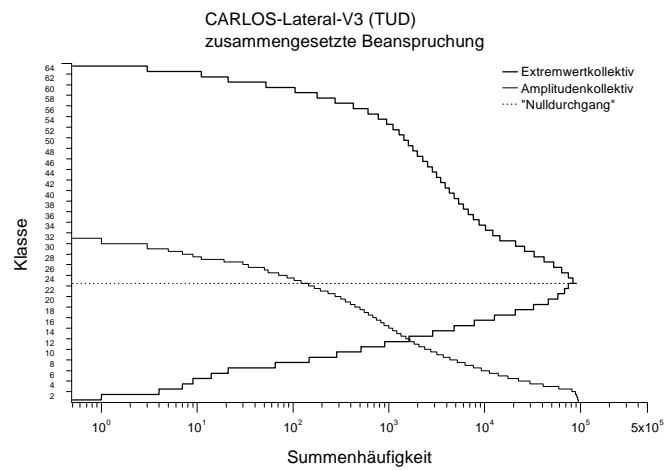


Abb. 16 Extremwert- und Amplitudenkollektive der Lastfolge CARLOS-V3 (TUD) und ihrer Belastungsanteile

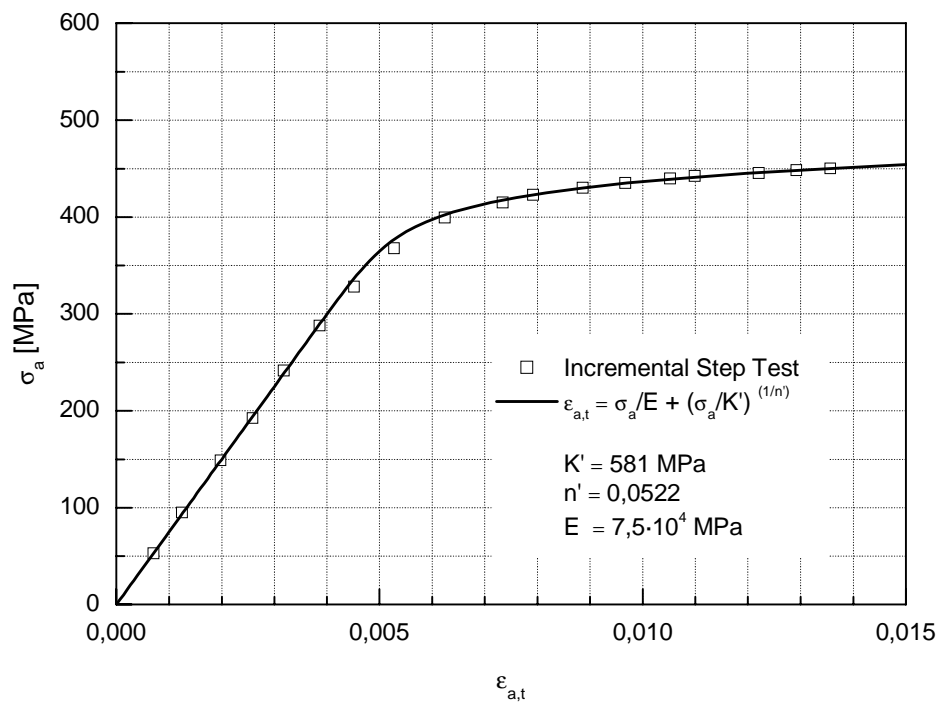


Abb. 17 zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AlCuMg2 flach

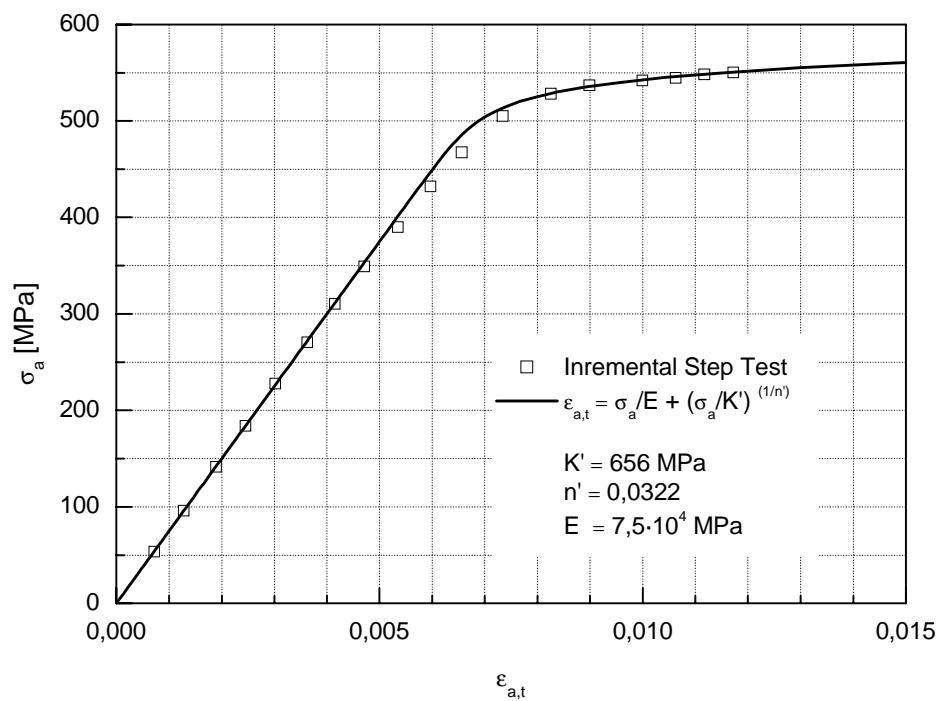


Abb. 18 zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AlCuMg2 rund

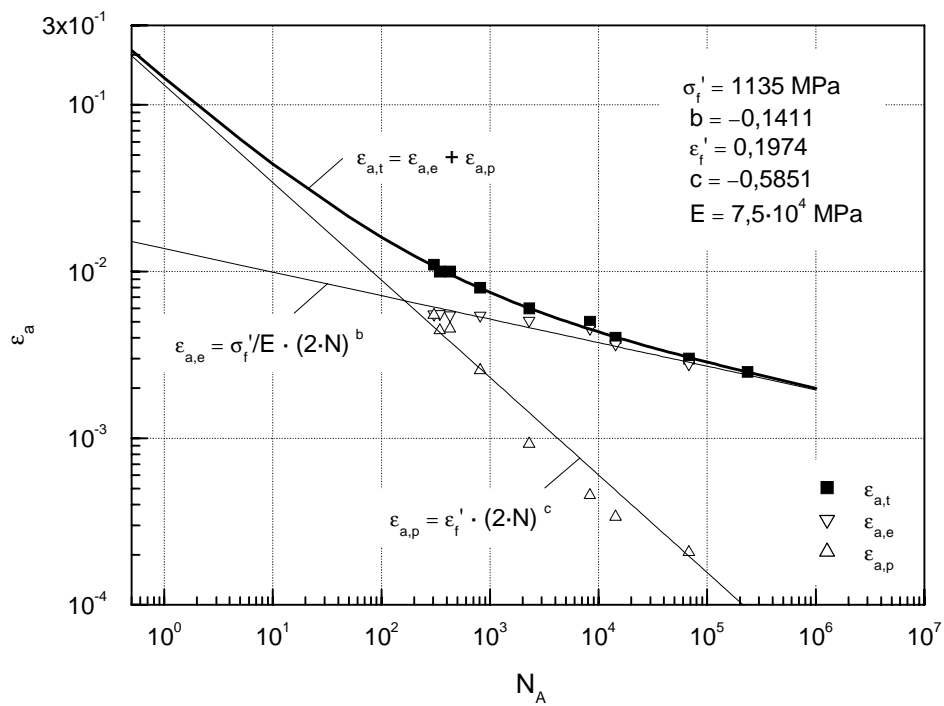


Abb. 19 Anrißdehnungswöhlerlinie AlCuMg2 flach

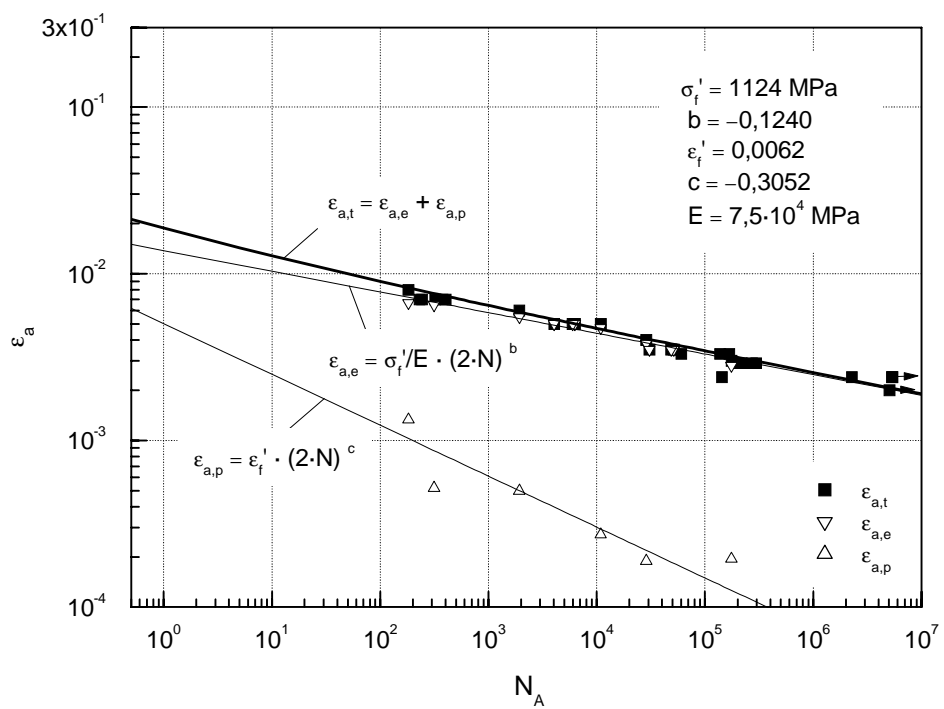


Abb. 20 Anrißdehnungswöhlerlinie AlCuMg2 rund

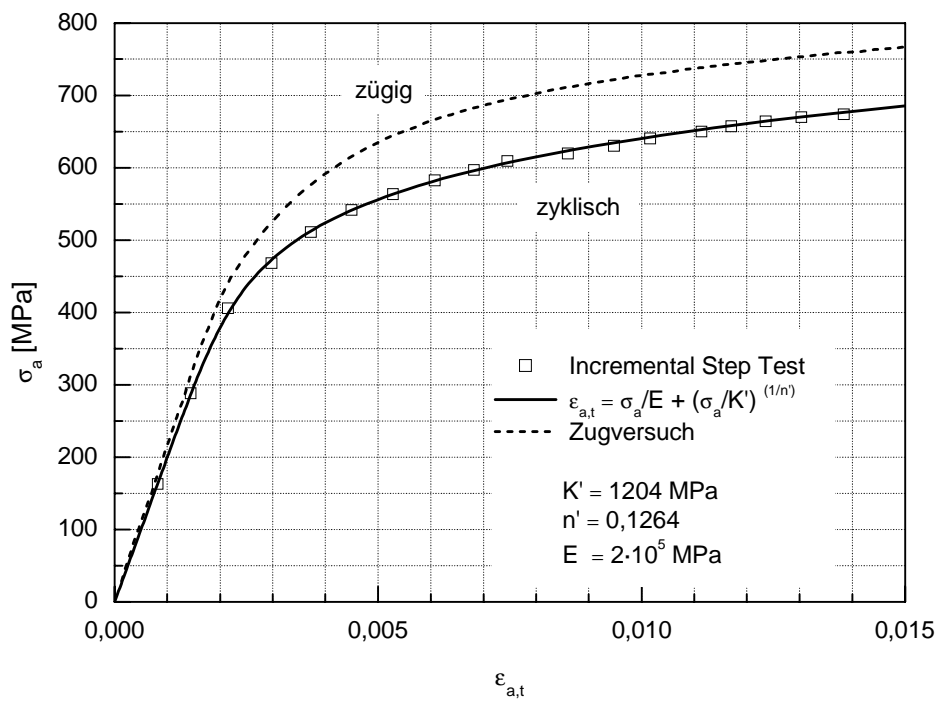


Abb. 21 zügige und zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve Metasafe 900 flach

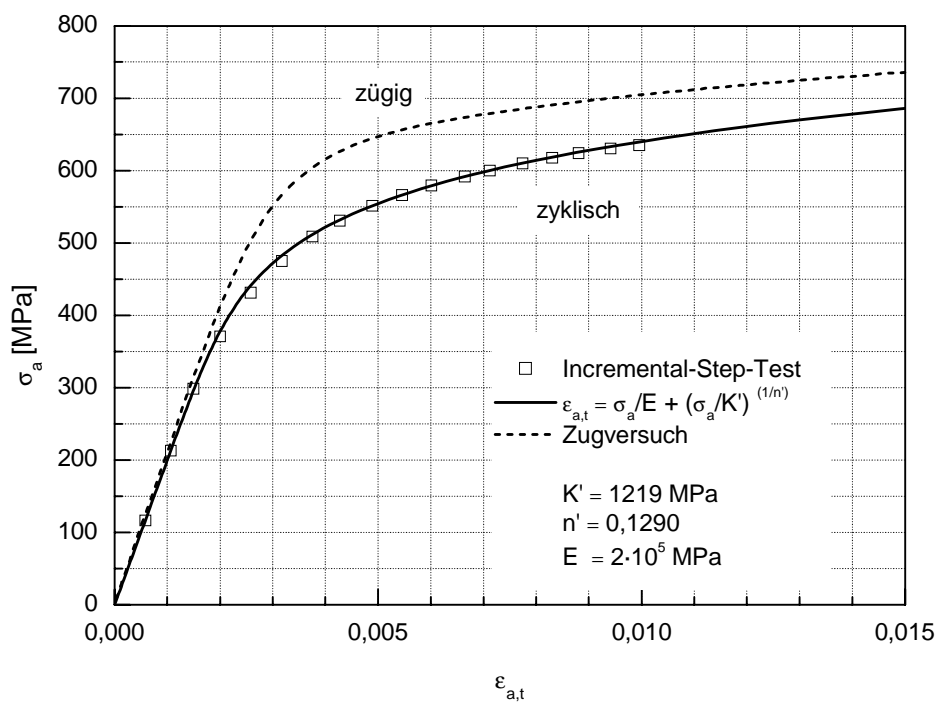


Abb. 22 zügige und zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve Metasafe 900 rund

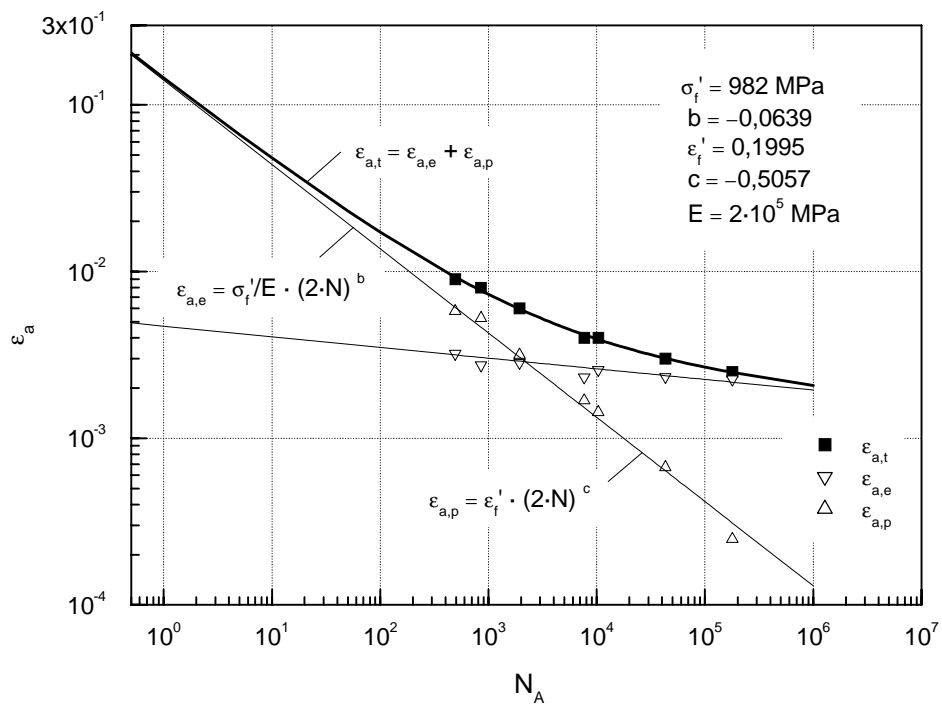


Abb. 23 Anrißdehnungswöhlerlinie Metasafe 900 flach

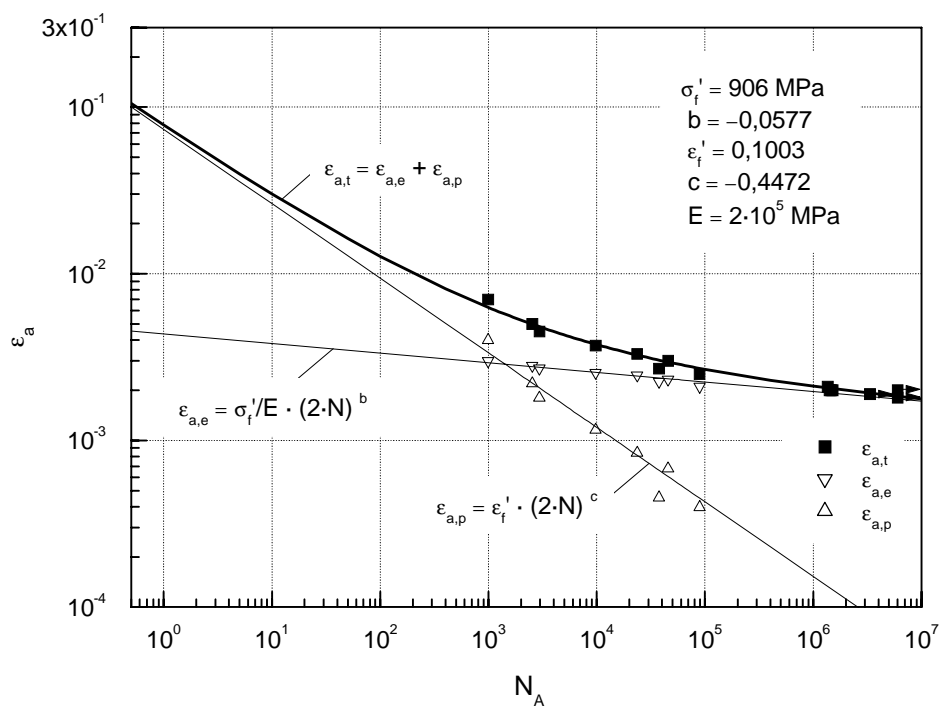


Abb. 24 Anrißdehnungswöhlerlinie Metasafe 900 rund

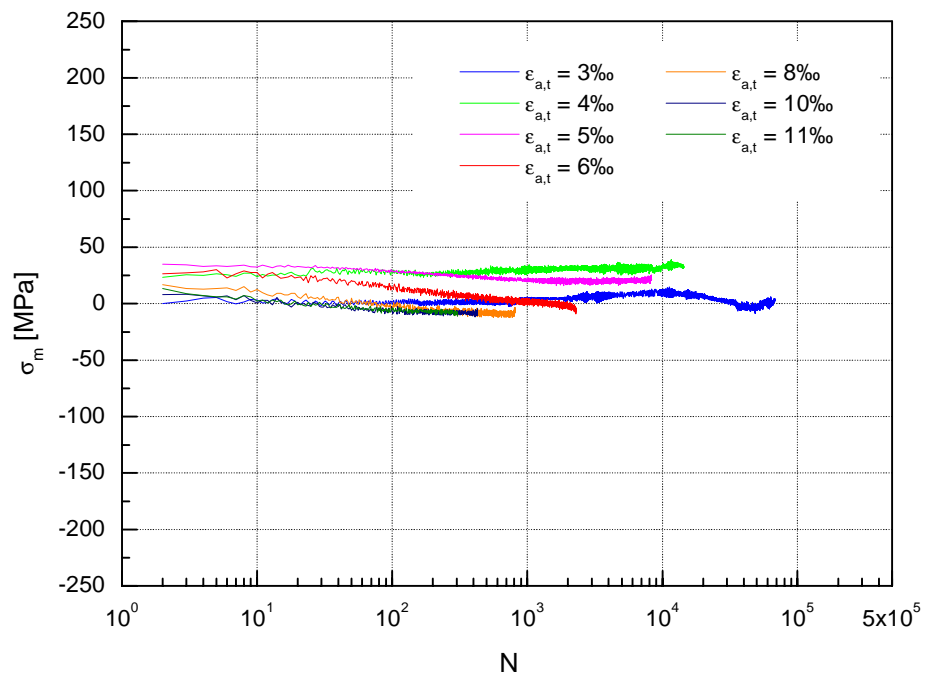


Abb. 25 Mittelspannung AlCuMg2 flach; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = 0\text{‰}$

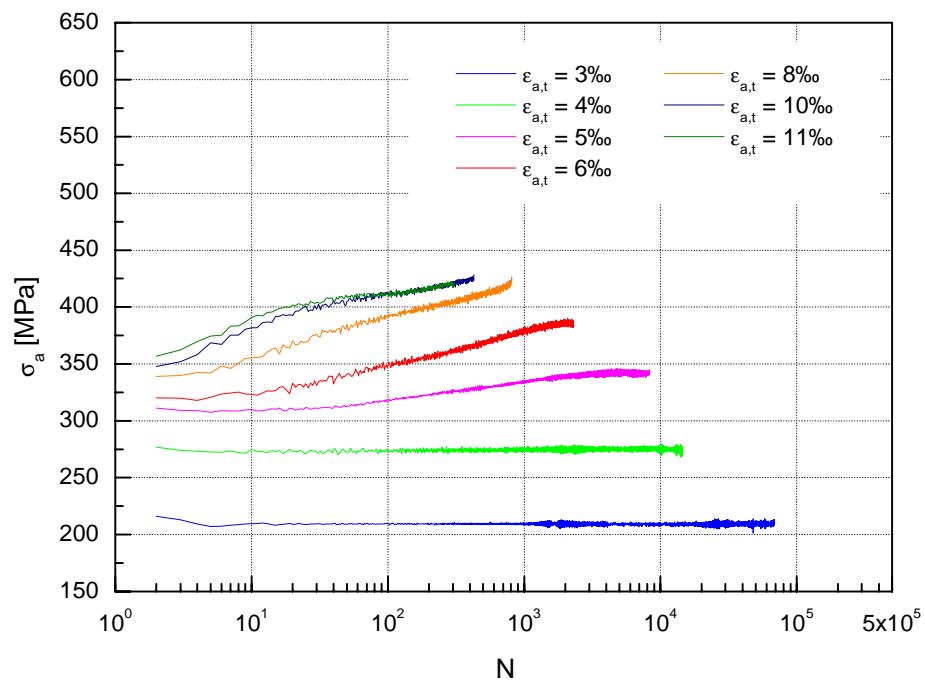


Abb. 26 Spannungsamplitude AlCuMg2 flach; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = 0\text{‰}$

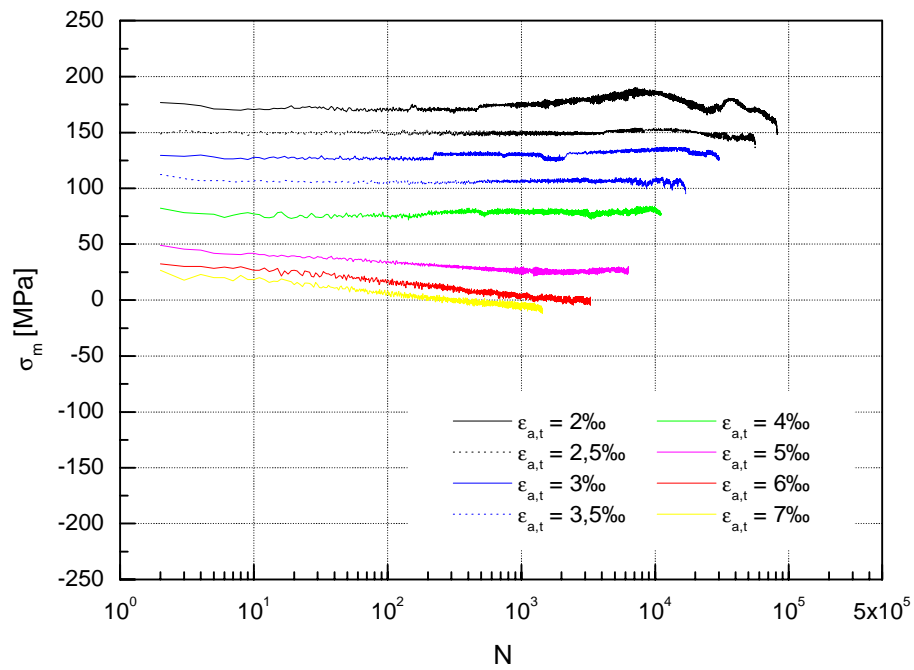


Abb. 27 Mittelspannung AlCuMg2 flach; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = +4\text{‰}$

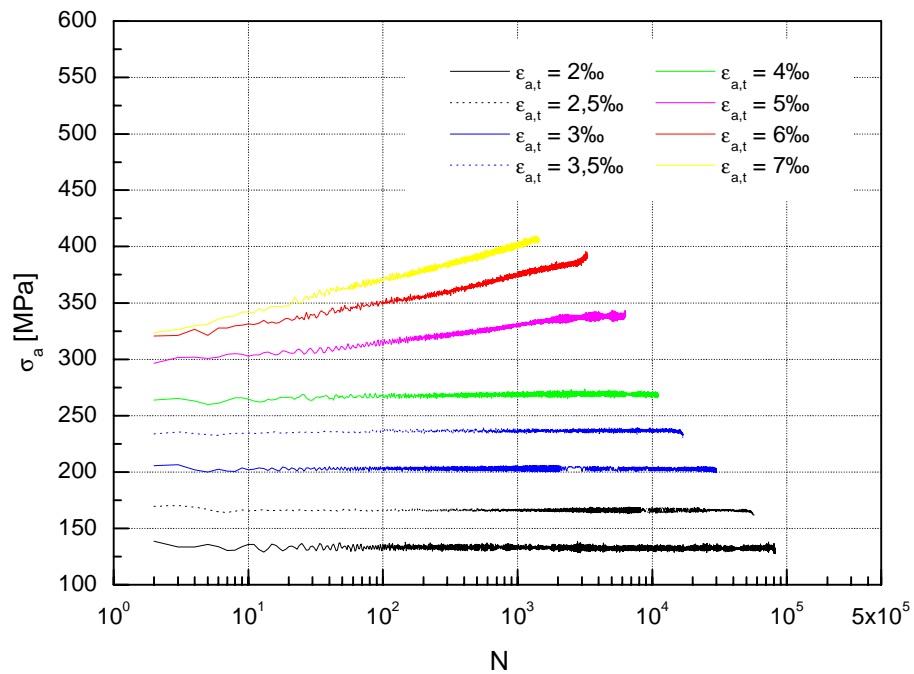


Abb. 28 Spannungsamplitude AlCuMg2 flach; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = +4\text{‰}$

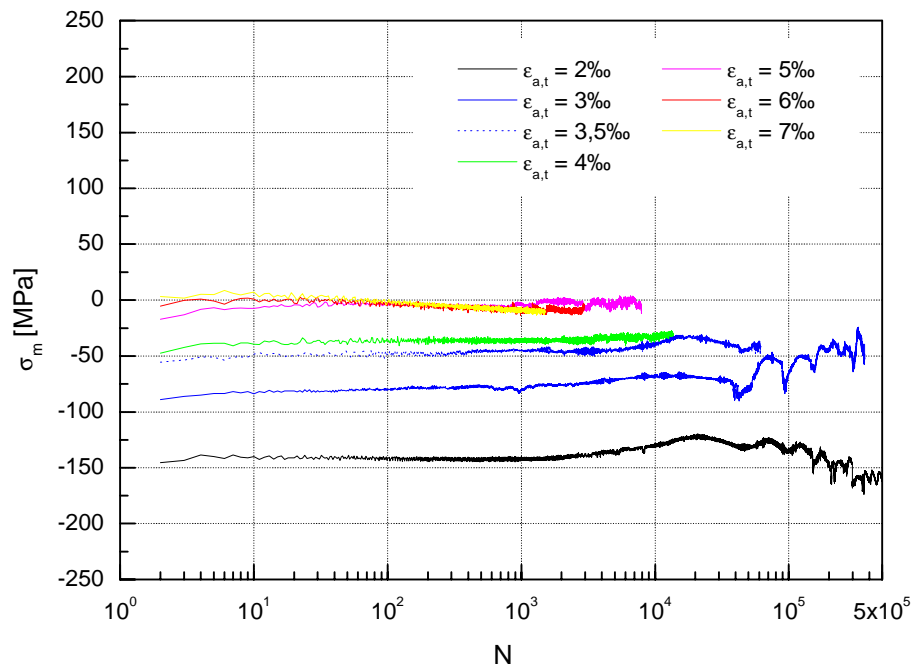


Abb. 29 Mittelspannung AlCuMg2 flach; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = -4\text{‰}$

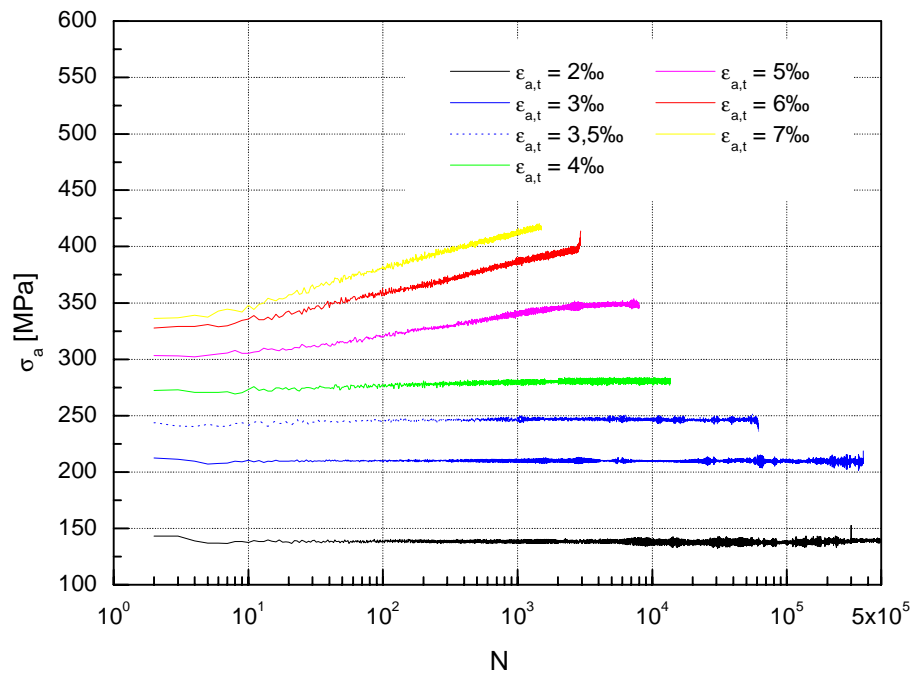


Abb. 30 Spannungsamplitude AlCuMg2 flach; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = -4\text{‰}$

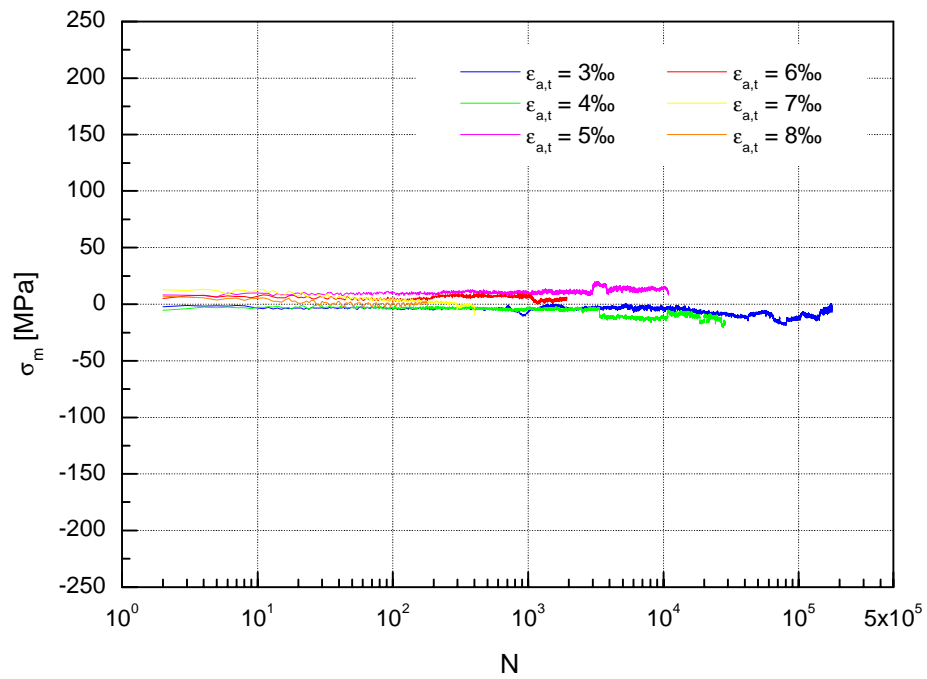


Abb. 31 Mittelspannung AlCuMg2 rund; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\%$

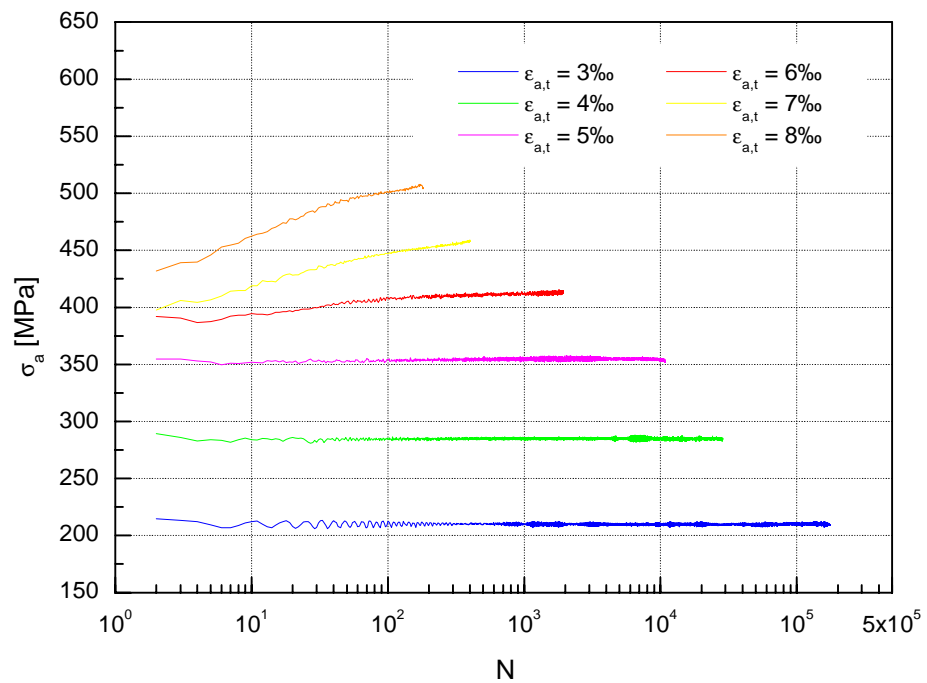


Abb. 32 Spannungsamplitude AlCuMg2 rund; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\%$

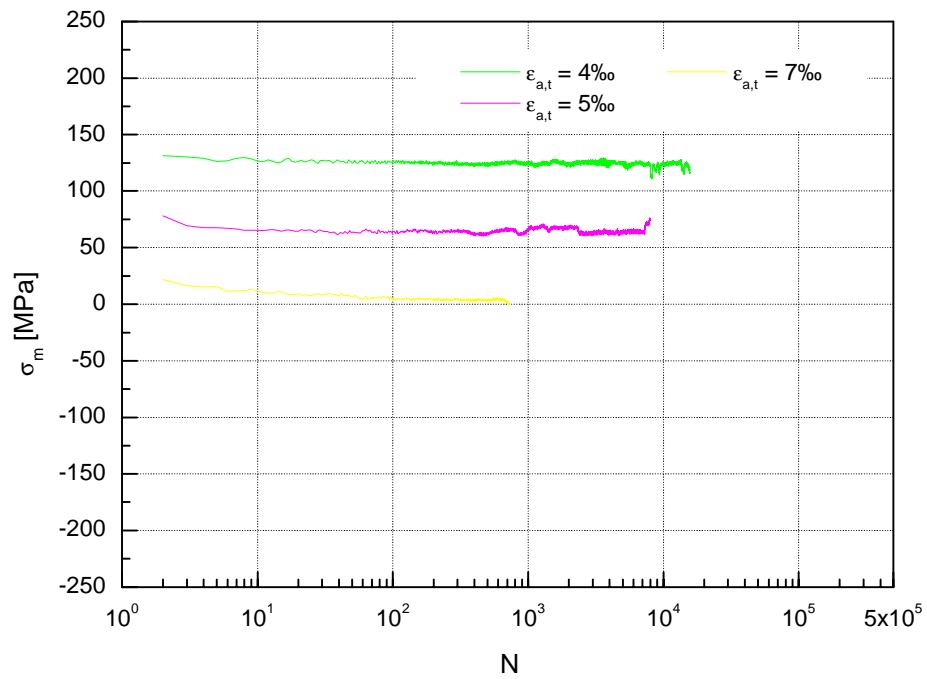


Abb. 33 Mittelspannung AlCuMg2 rund; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = +4\text{‰}$

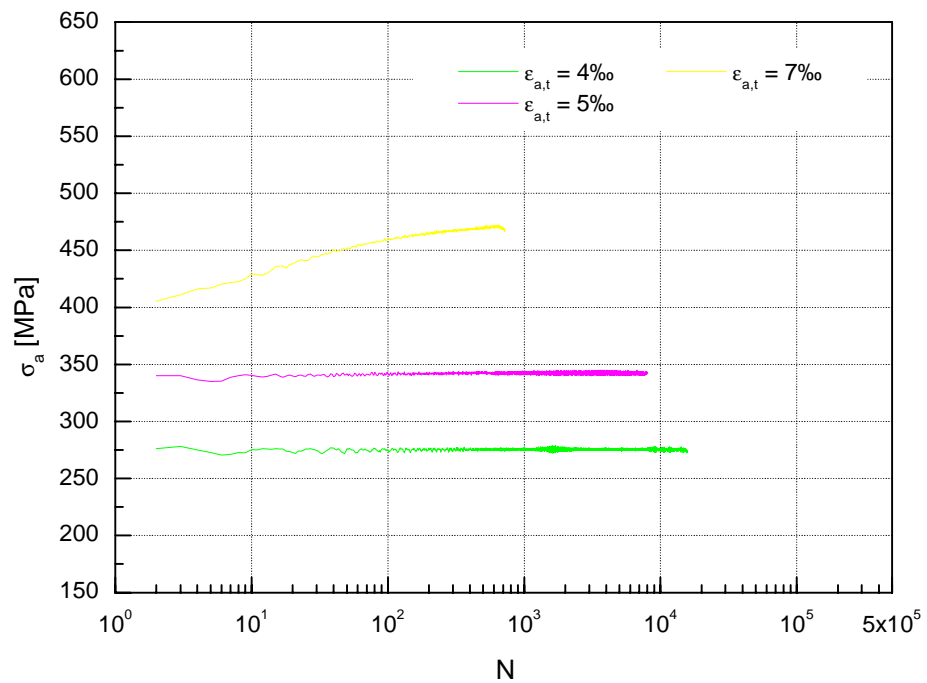


Abb. 34 Spannungsamplitude AlCuMg2 rund; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = +4\text{‰}$

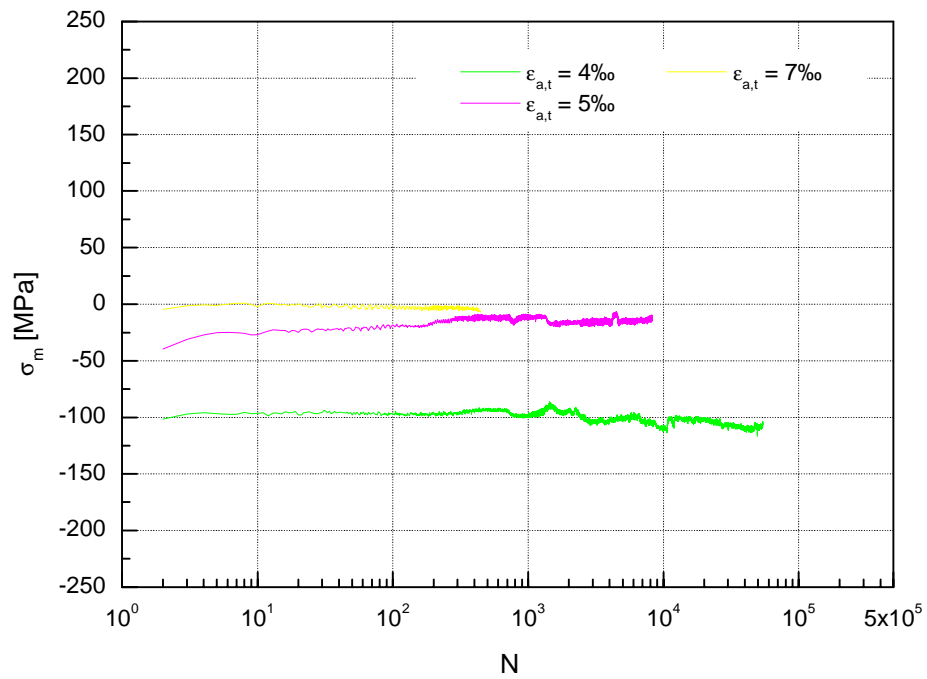


Abb. 35 Mittelspannung AlCuMg2 rund; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4\text{‰}$

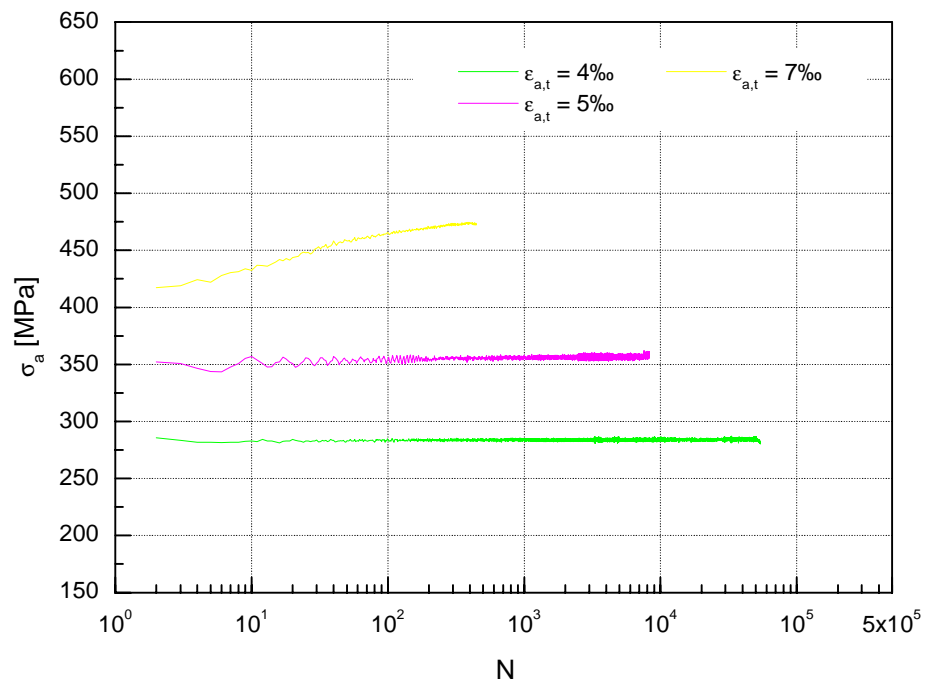


Abb. 36 Spannungsamplitude AlCuMg2 rund; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4\text{‰}$

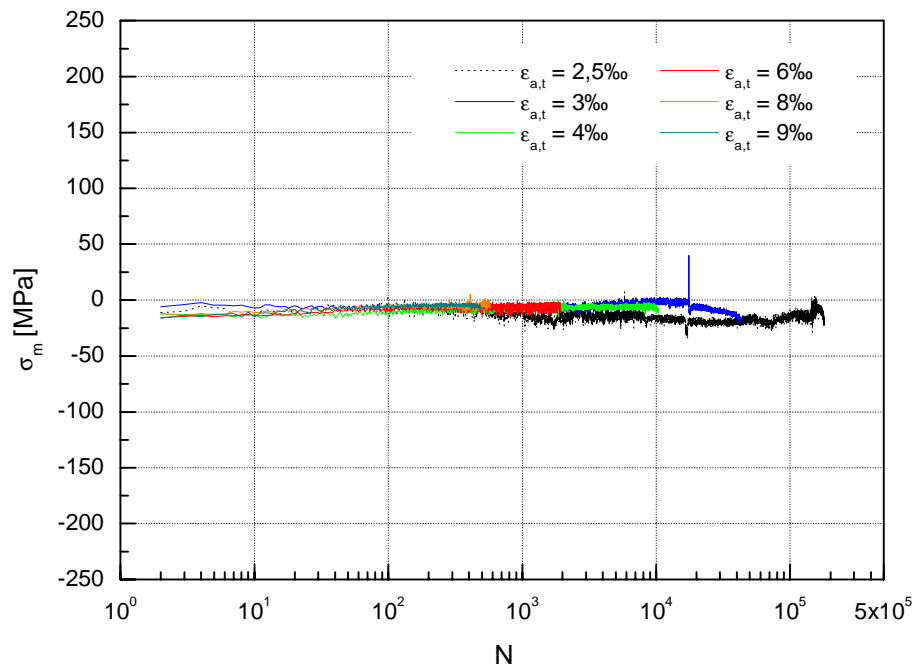


Abb. 37 Mittelspannung Metasafe 900 flach; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = 0\text{‰}$

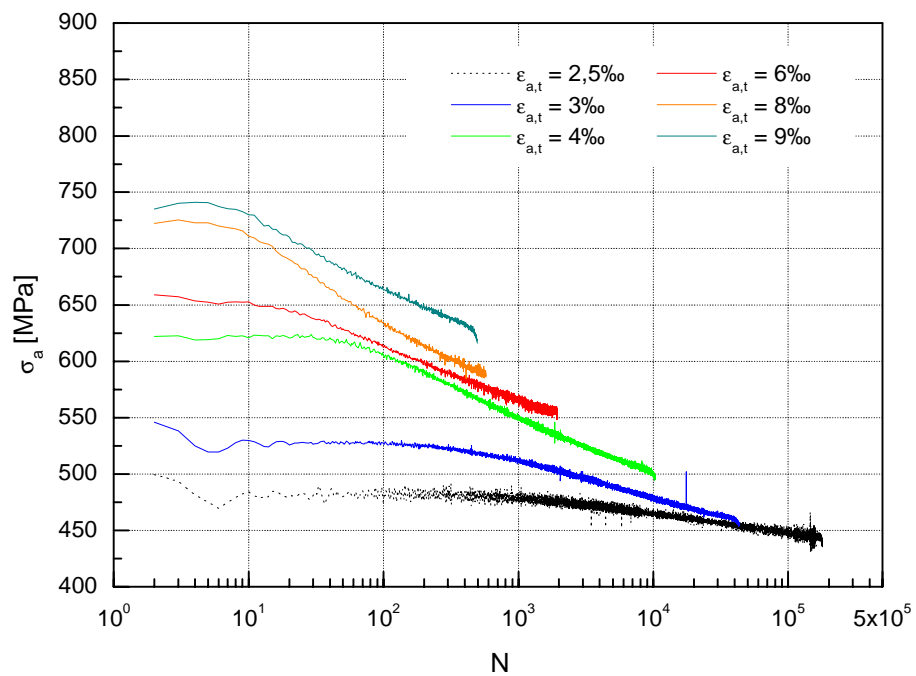


Abb. 38 Spannungsamplitude Metasafe 900 flach; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = 0\text{‰}$

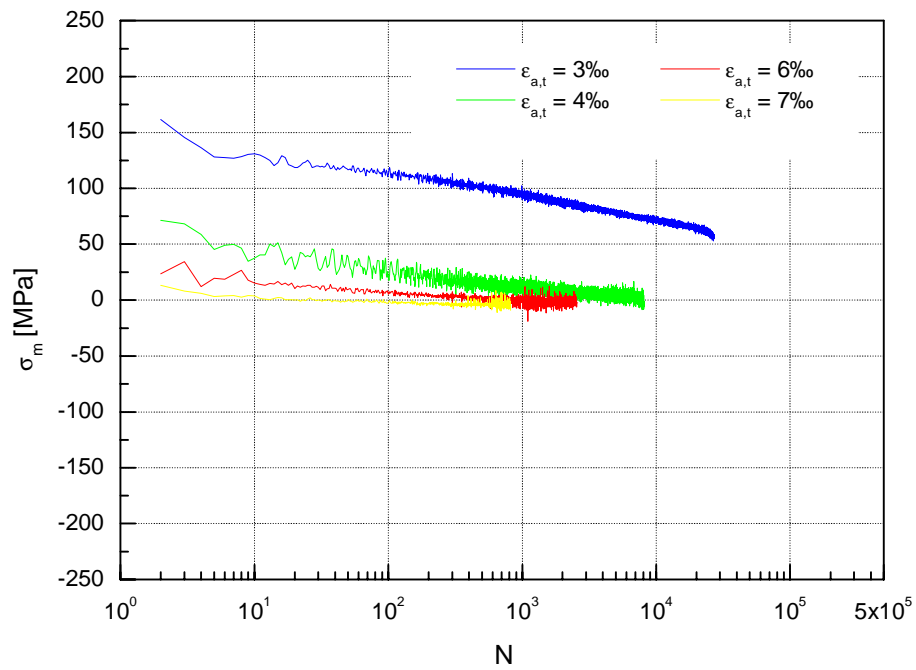


Abb. 39 Mittelspannung Metasafe 900 flach; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = +4\text{‰}$

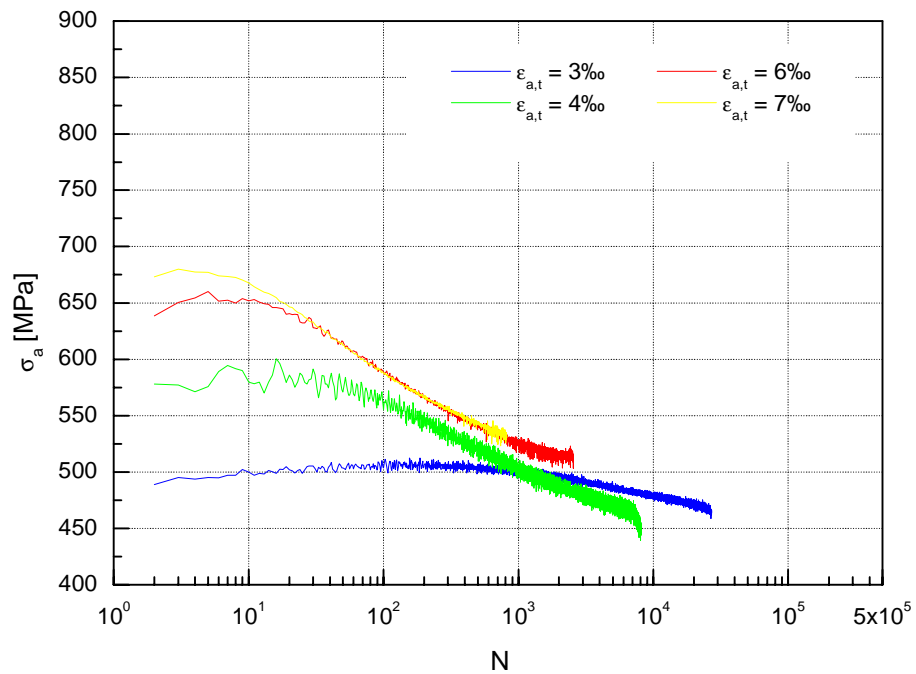


Abb. 40 Spannungsamplitude Metasafe 900 flach; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = +4\text{‰}$

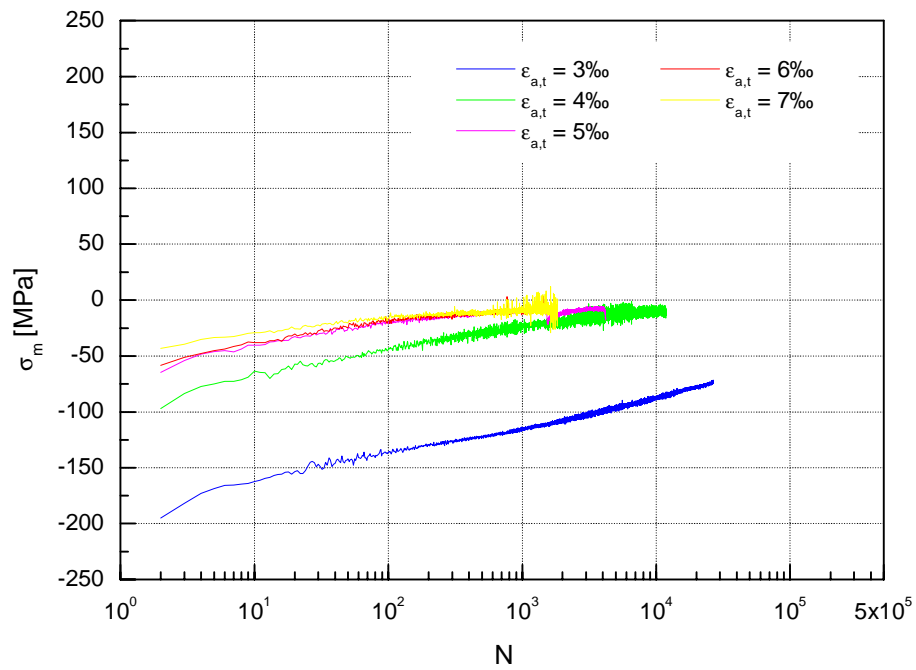


Abb. 41 Mittelspannung Metasafe 900 flach; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4\text{‰}$

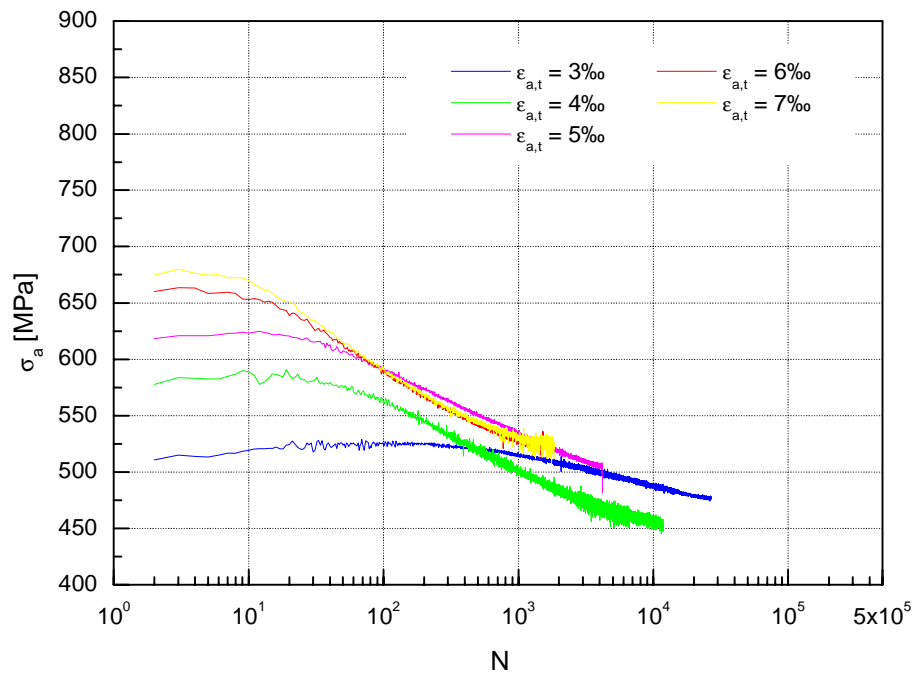


Abb. 42 Spannungsamplitude Metasafe 900 flach; einstufig ϵ -gesteuert; $\epsilon_m = -4\text{‰}$

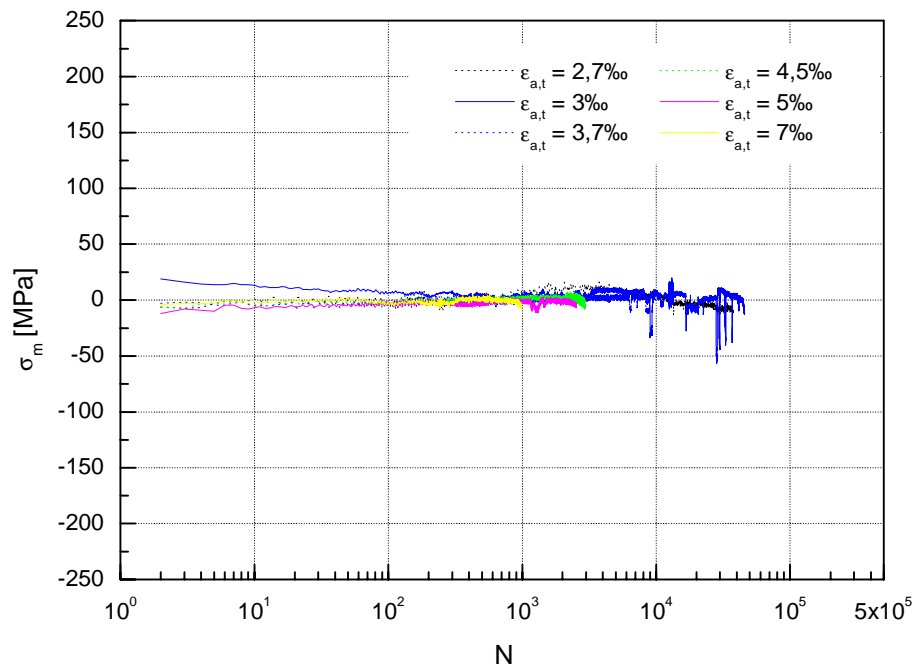


Abb. 43 Mittelspannung Metasafe 900 rund; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$

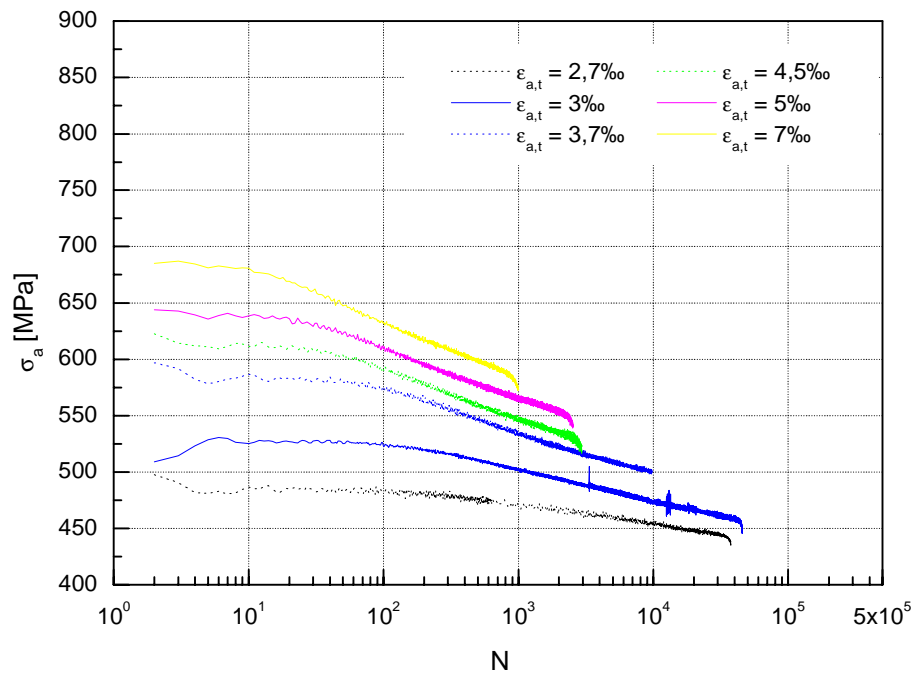


Abb. 44 Spannungsamplitude Metasafe 900 rund; einstufig ε -gesteuert; $\varepsilon_m = 0\text{‰}$

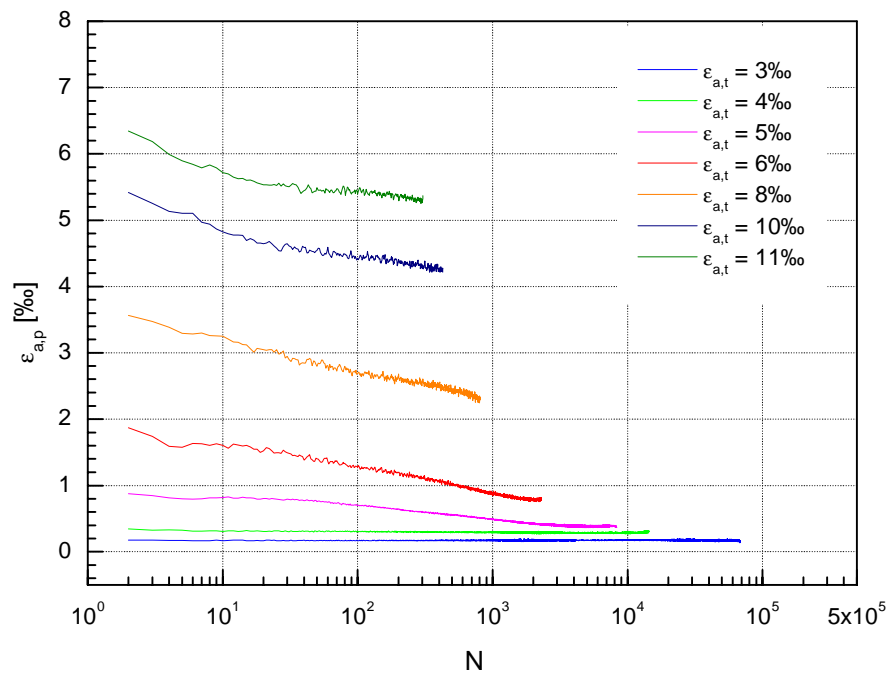


Abb. 45 plastische Dehnungsamplitude AlCuMg2 flach; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = 0\%$

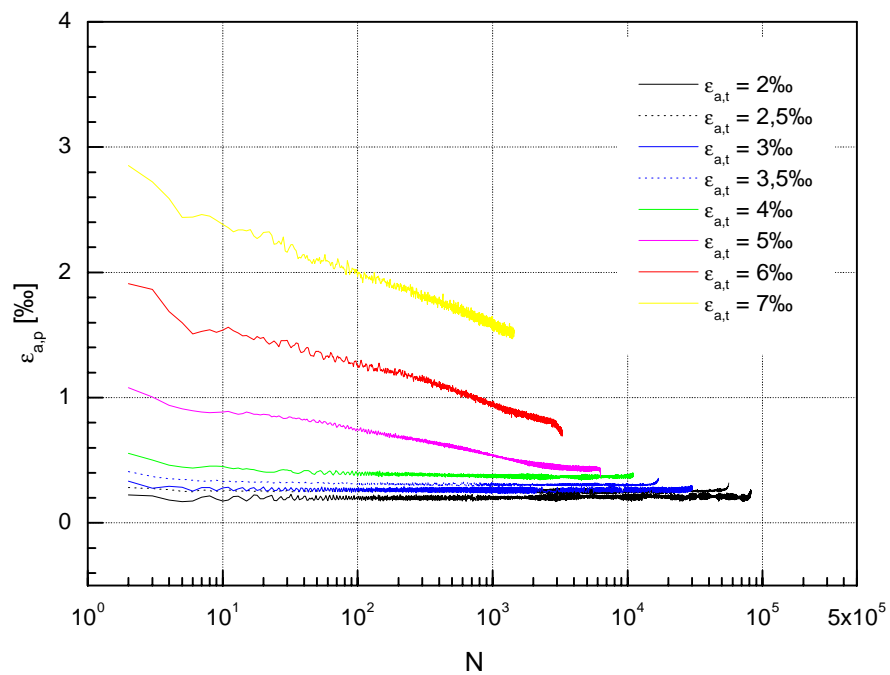


Abb. 46 plastische Dehnungsamplitude AlCuMg2 flach; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = +4\%$

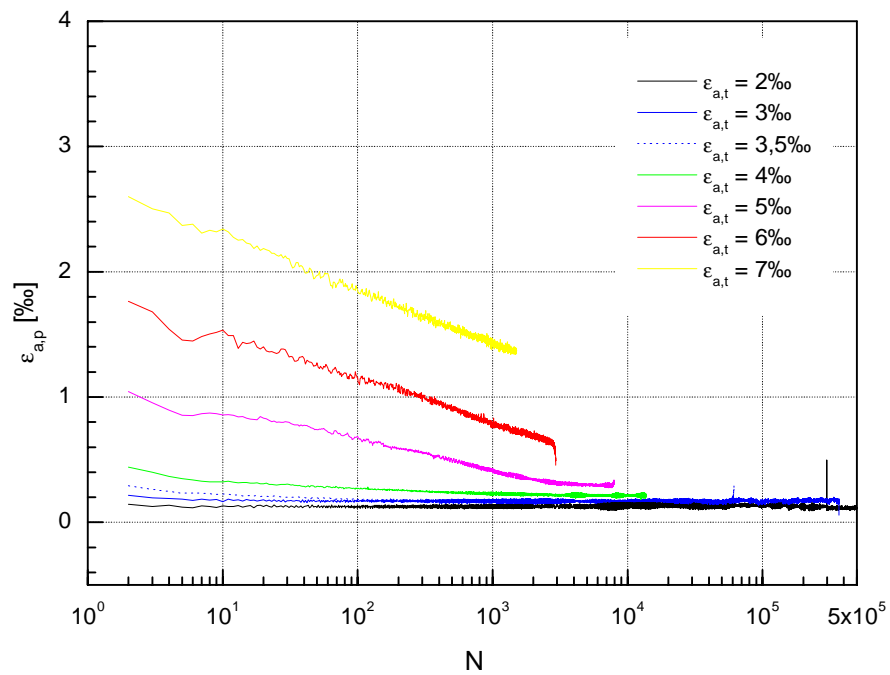


Abb. 47 plastische Dehnungsamplitude AlCuMg2 flach; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = -4\text{‰}$

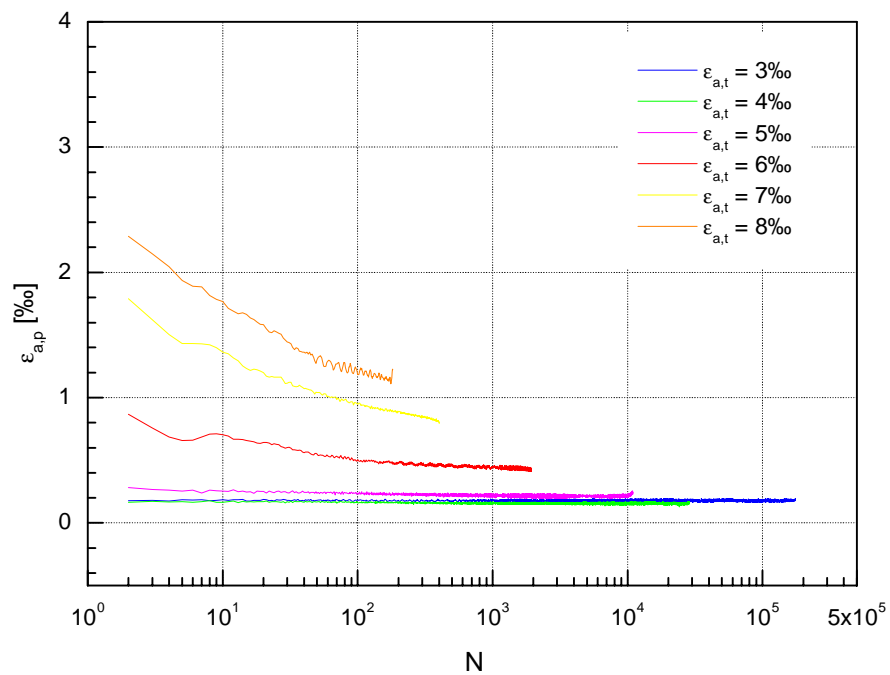


Abb. 48 plastische Dehnungsamplitude AlCuMg2 rund; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = 0\text{‰}$

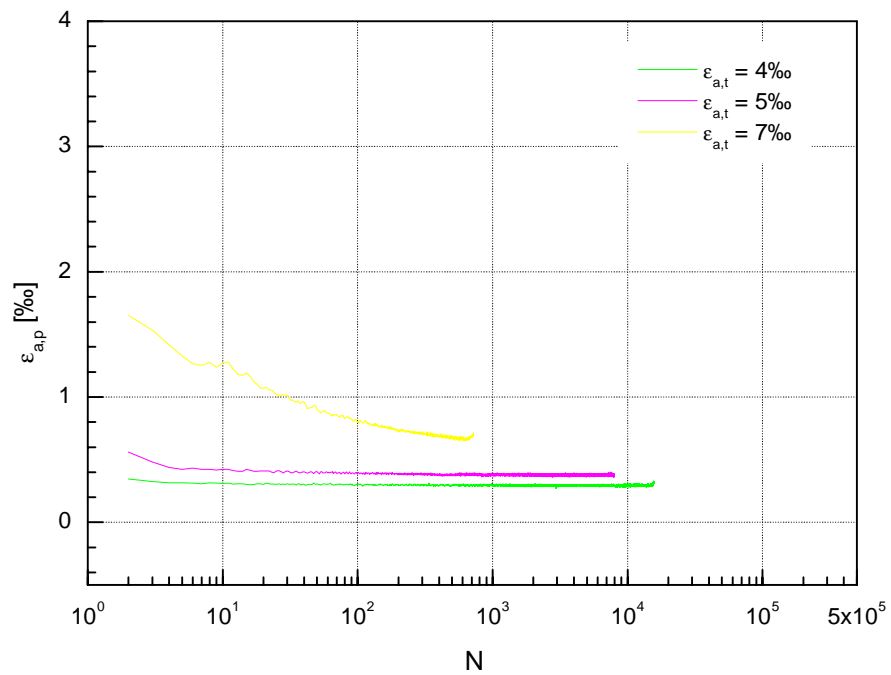


Abb. 49 plastische Dehnungsamplitude AlCuMg2 rund; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = +4\text{‰}$

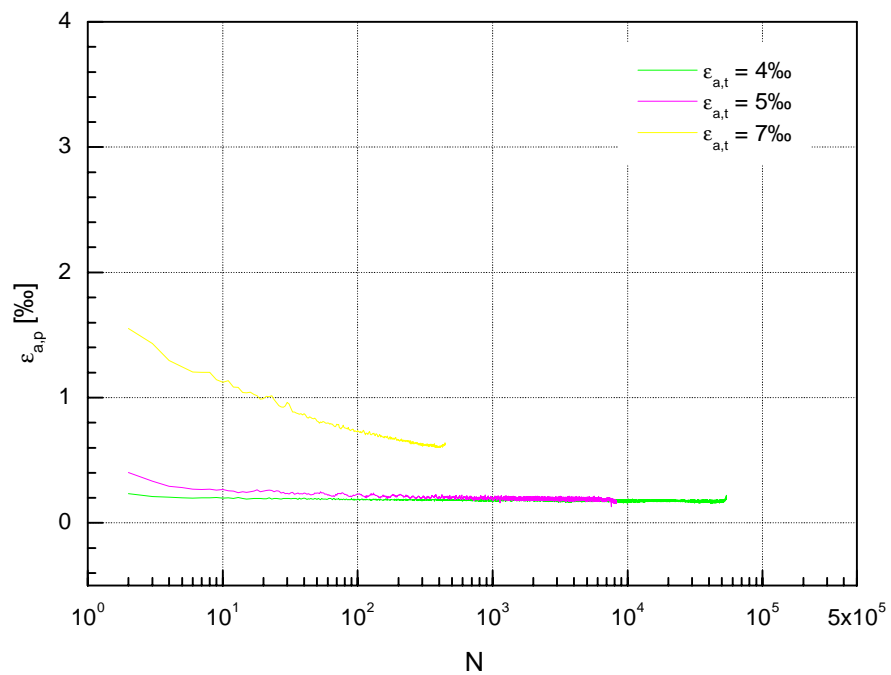


Abb. 50 plastische Dehnungsamplitude AlCuMg2 rund; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = -4\text{‰}$

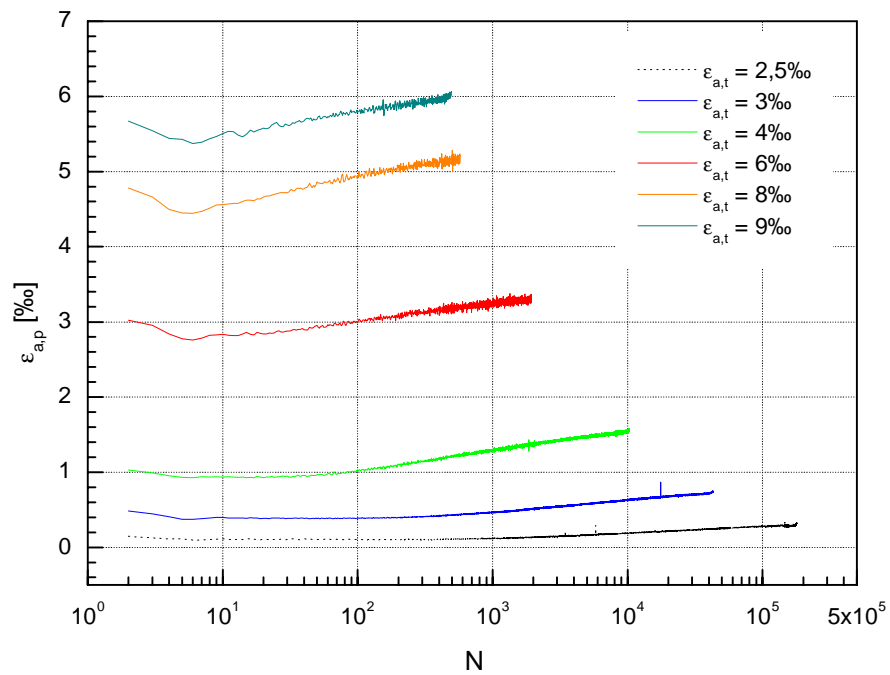


Abb. 51 plastische Dehnungsamplitude Metasafe 900 flach; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = 0\%$

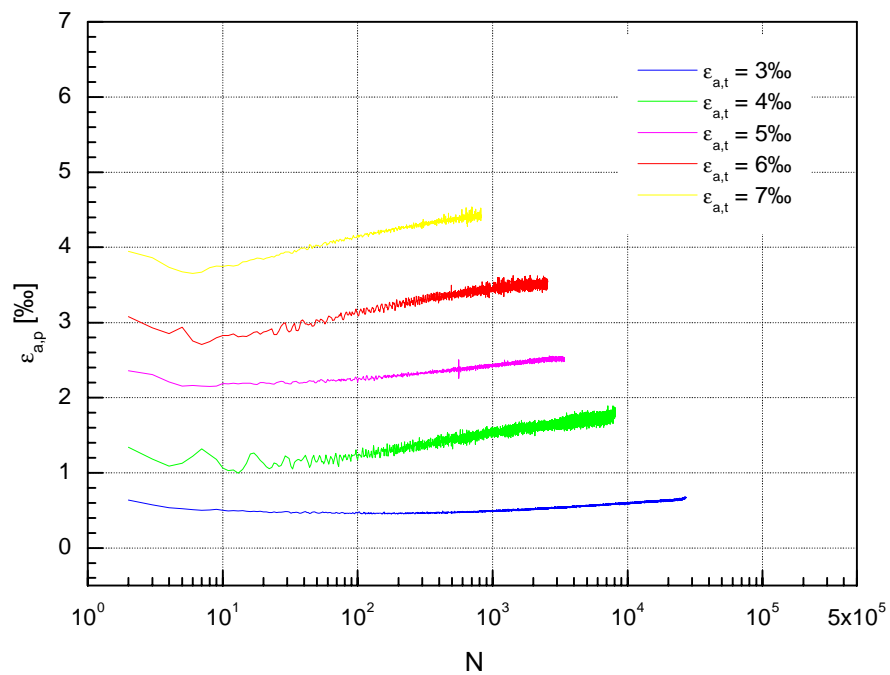


Abb. 52 plastische Dehnungsamplitude Metasafe 900 flach; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = +4\%$

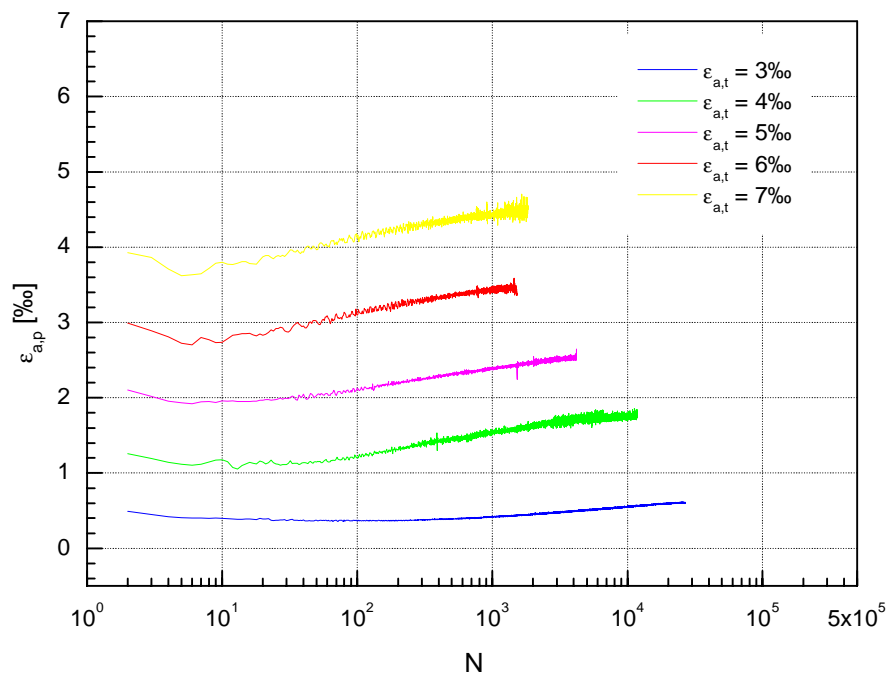


Abb. 53 plastische Dehnungsamplitude Metasafe 900 flach; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = -4\text{‰}$

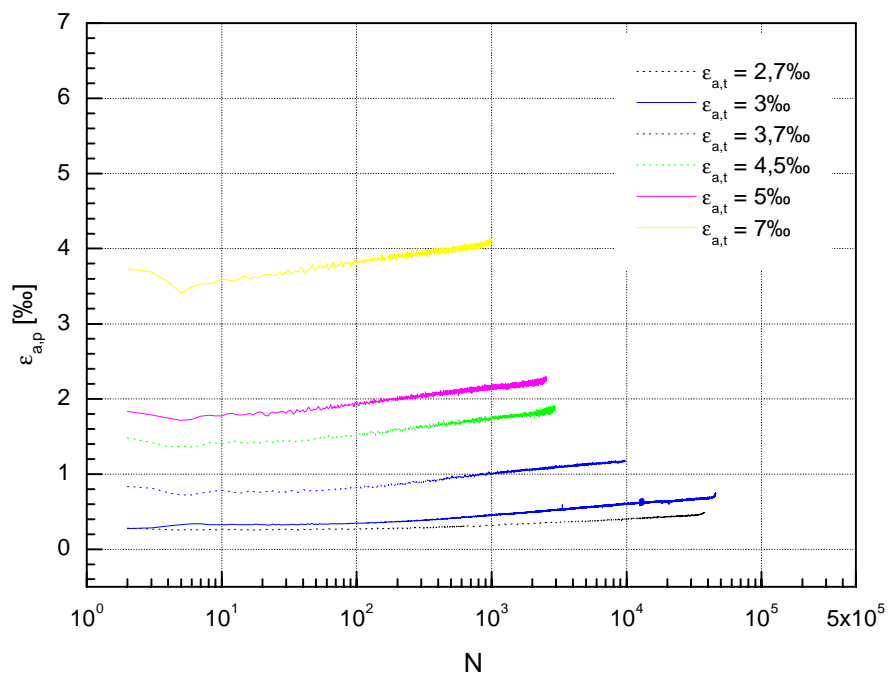


Abb. 54 plastische Dehnungsamplitude Metasafe 900 rund; einstufig ε -gesteuert;
 $\varepsilon_m = 0\text{‰}$

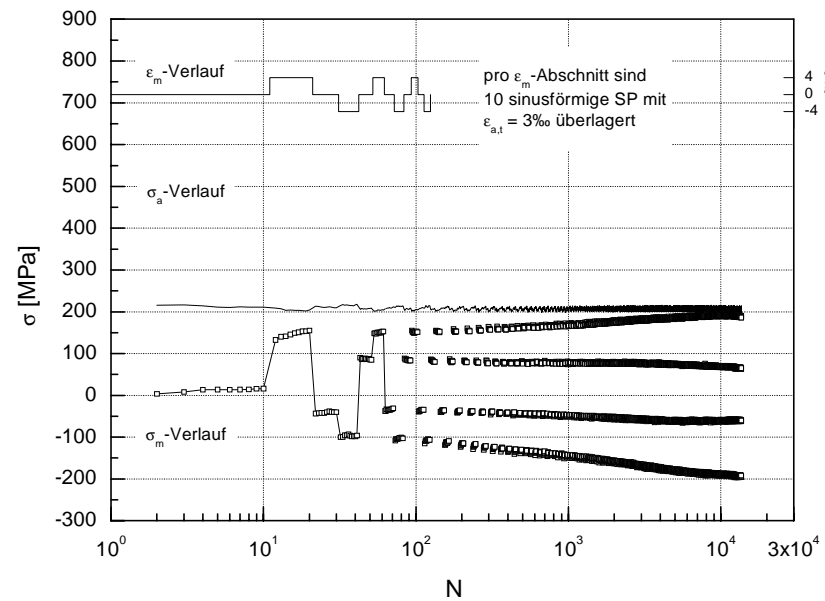


Abb. 55 Mittelspannung, Spannungsamplitude
AlCuMg2 flach; Lastfolge lfcd; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

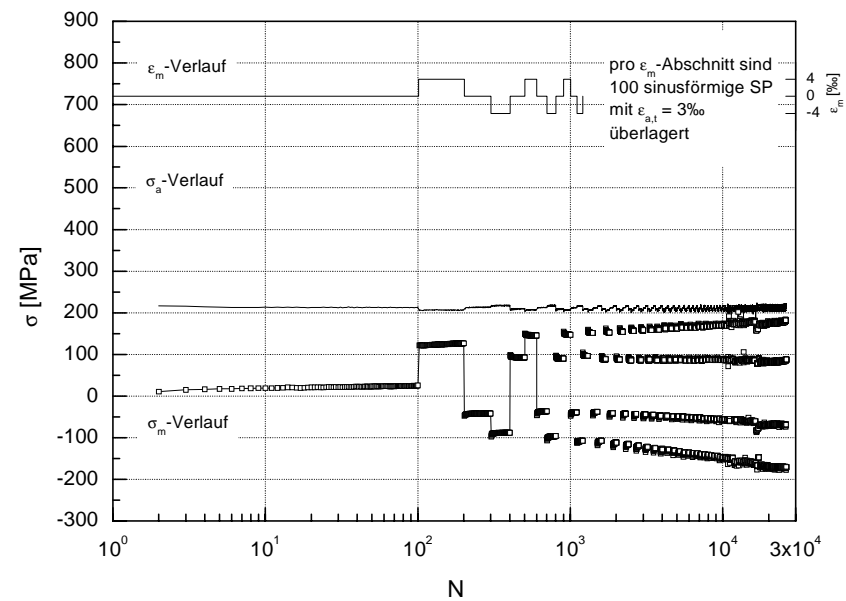


Abb. 56 Mittelspannung, Spannungsamplitude
AlCuMg2 flach; Lastfolge lfcb; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

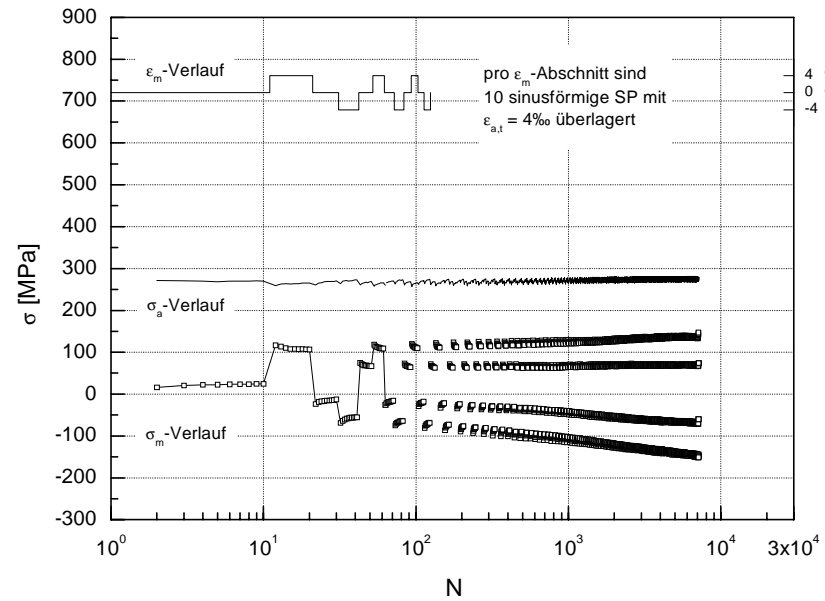


Abb. 57 Mittelspannung, Spannungsamplitude
AlCuMg2 flach; Lastfolge lfad; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

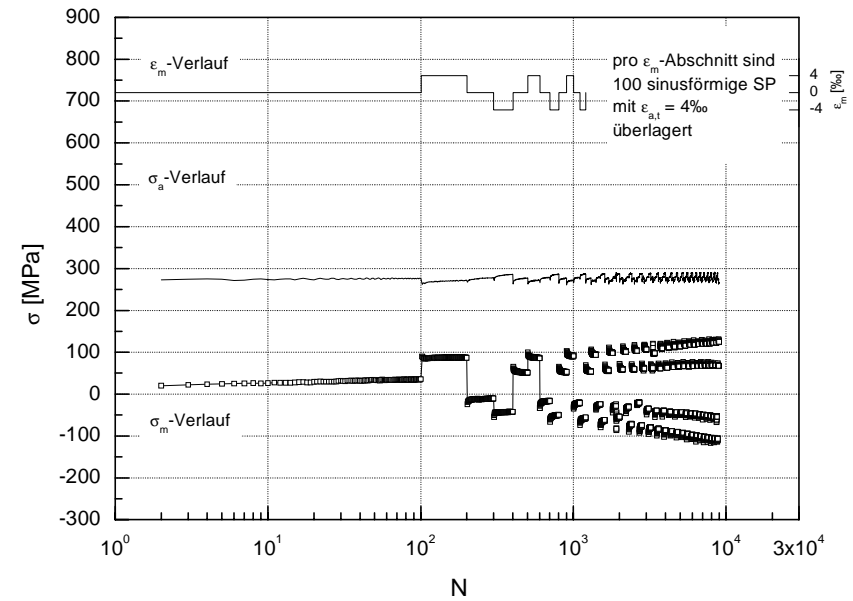


Abb. 58 Mittelspannung, Spannungsamplitude
AlCuMg2 flach; Lastfolge lfab; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

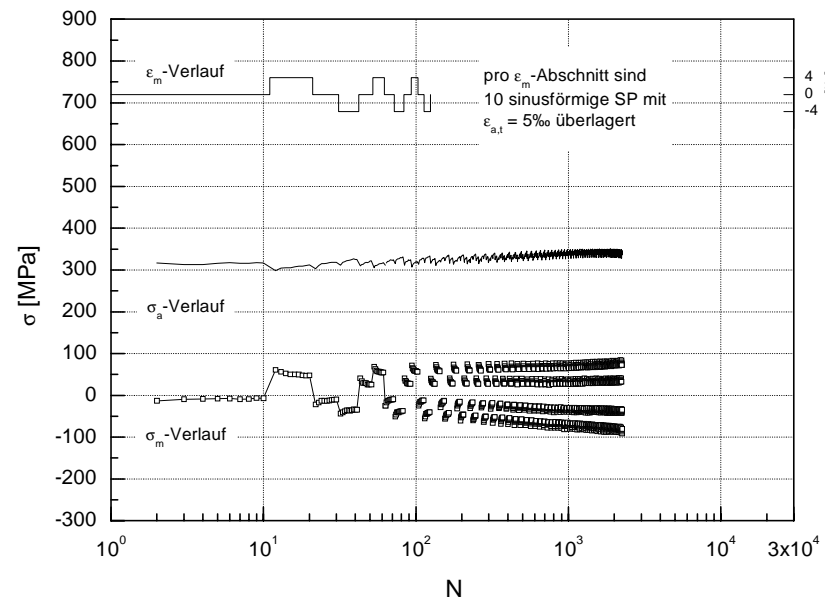


Abb. 59 Mittelspannung, Spannungsamplitude
AlCuMg2 flach; Lastfolge lfbd; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 5\text{‰}$

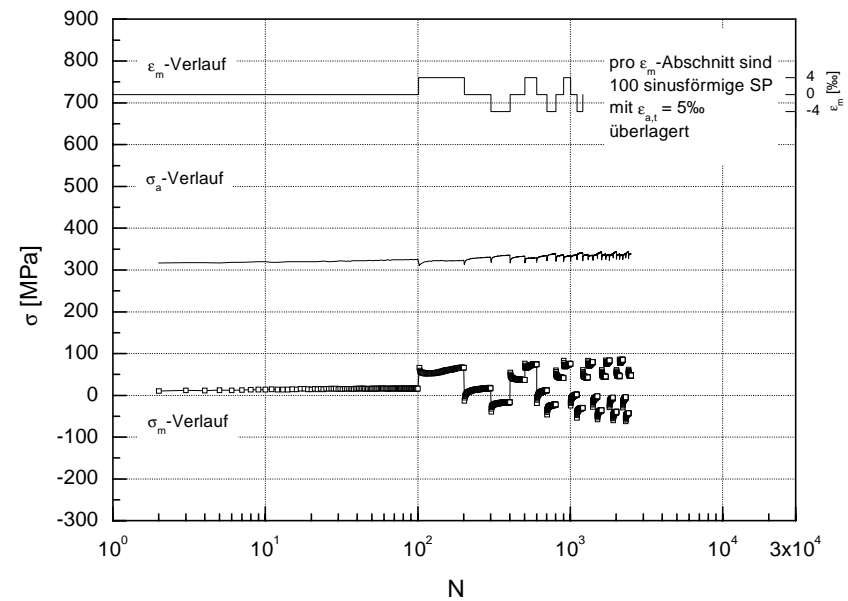


Abb. 60 Mittelspannung, Spannungsamplitude
AlCuMg2 flach; Lastfolge lfbd; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 5\text{‰}$

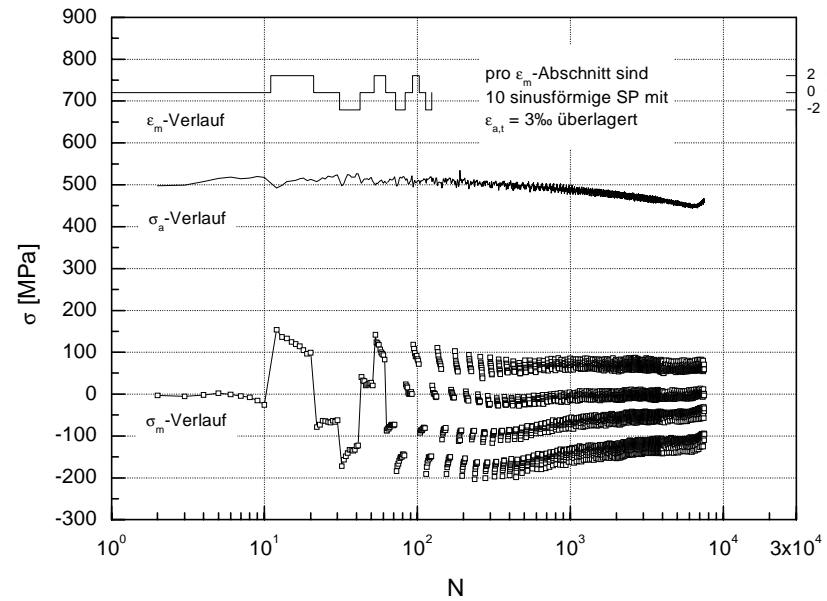


Abb. 61 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfbd; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -2; 0; +2\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

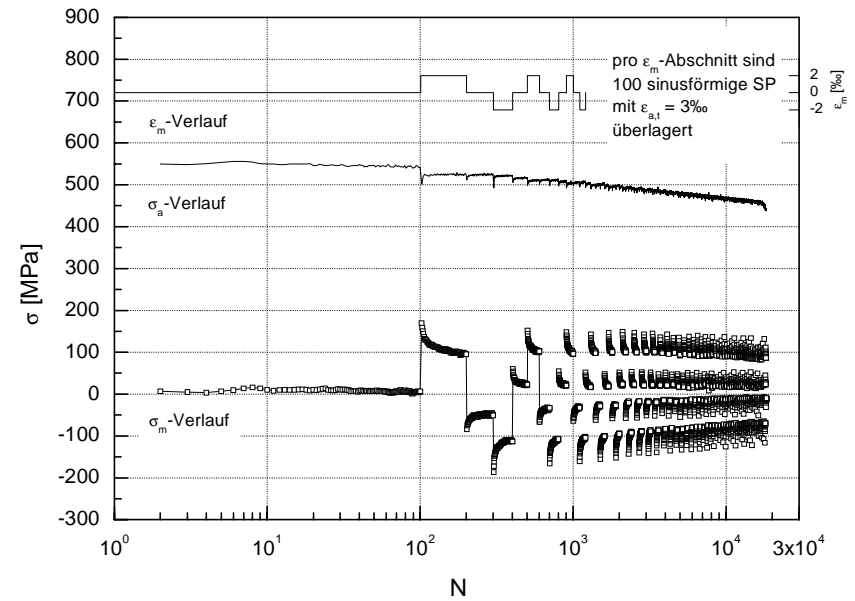


Abb. 62 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfbb; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -2; 0; +2\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

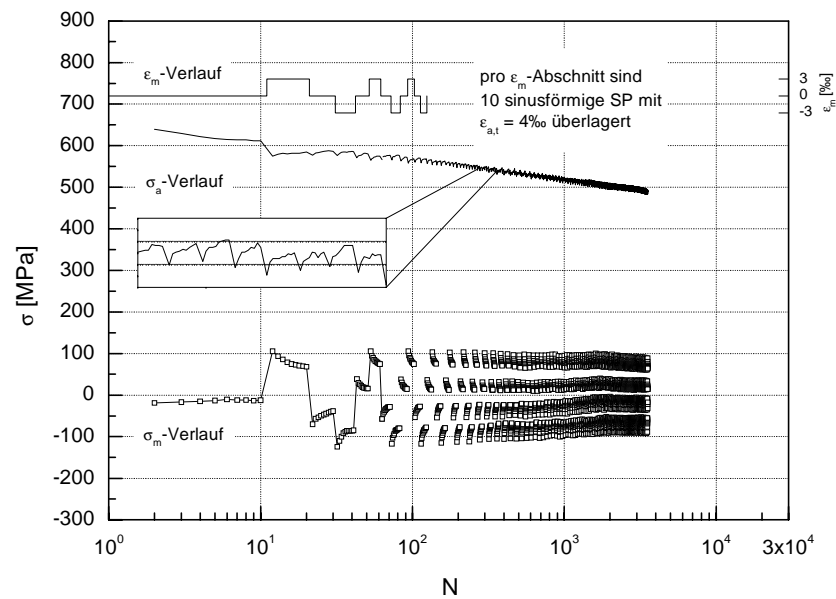


Abb. 63 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lffd; ε -gesteuert
 $\varepsilon_m = -3; 0; +3\text{‰}$; $\varepsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

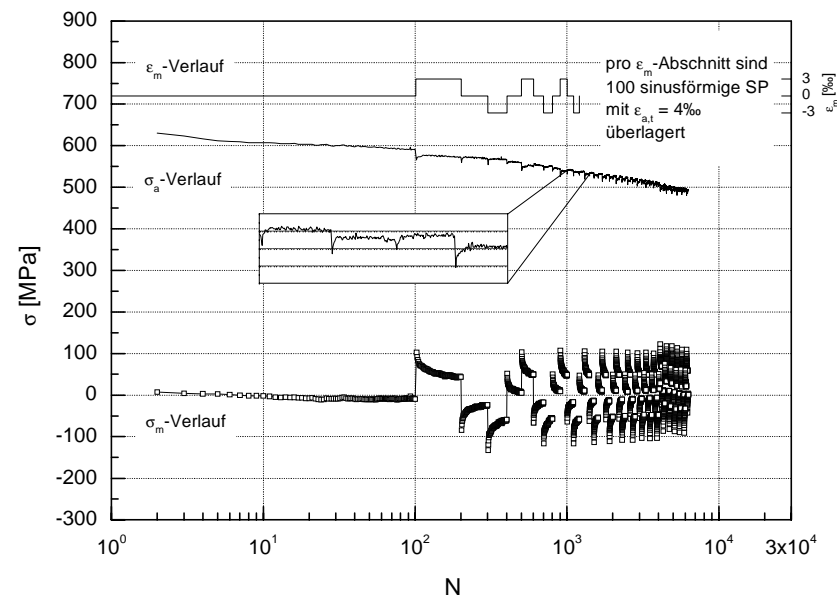


Abb. 64 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lffb; ε -gesteuert
 $\varepsilon_m = -3; 0; +3\text{‰}$; $\varepsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

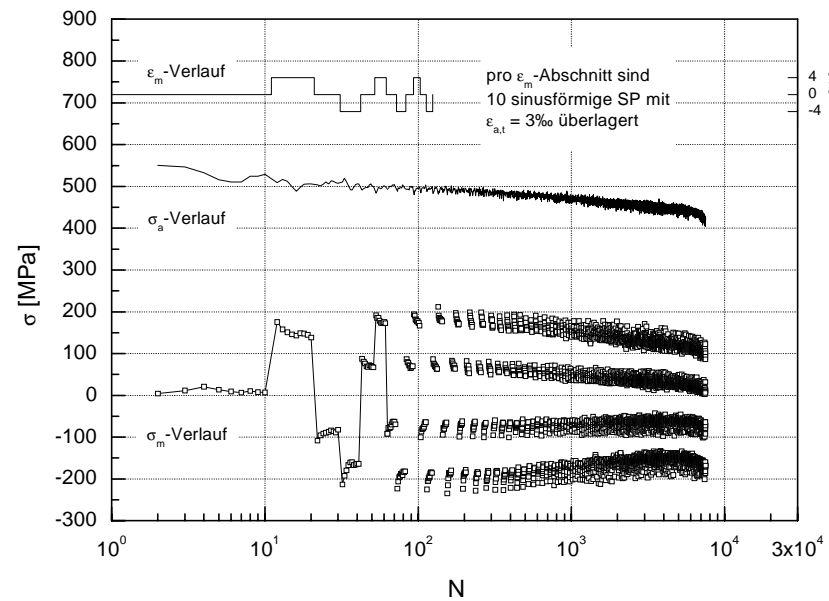


Abb. 65 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfcd; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

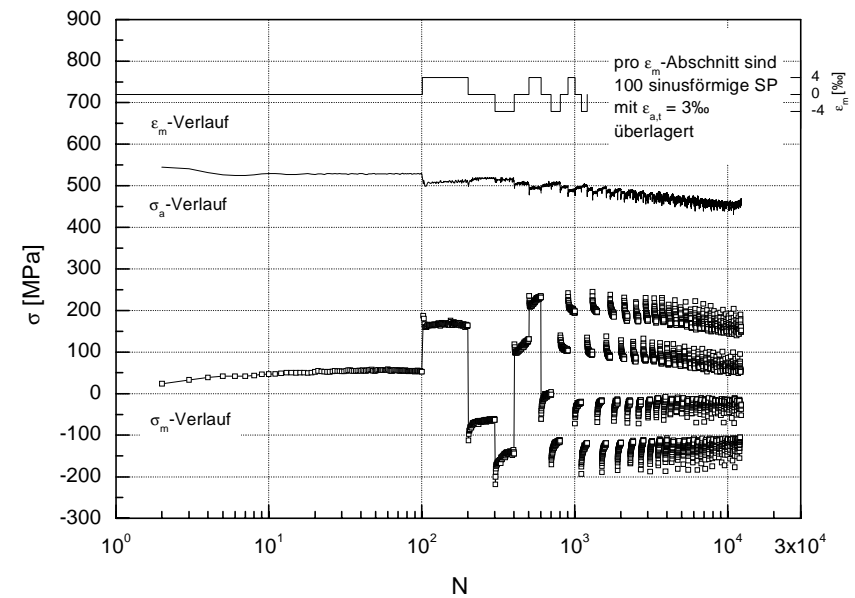


Abb. 66 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfcb; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

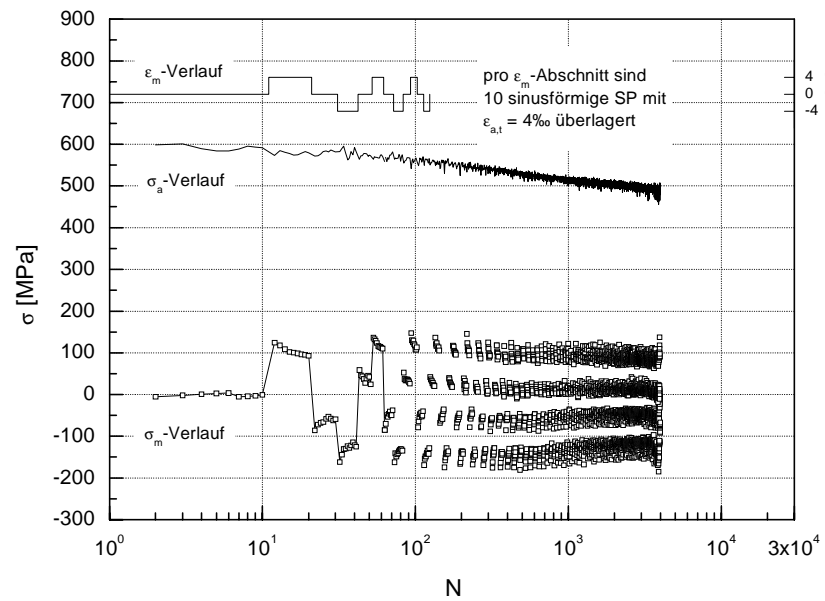


Abb. 67 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfad; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

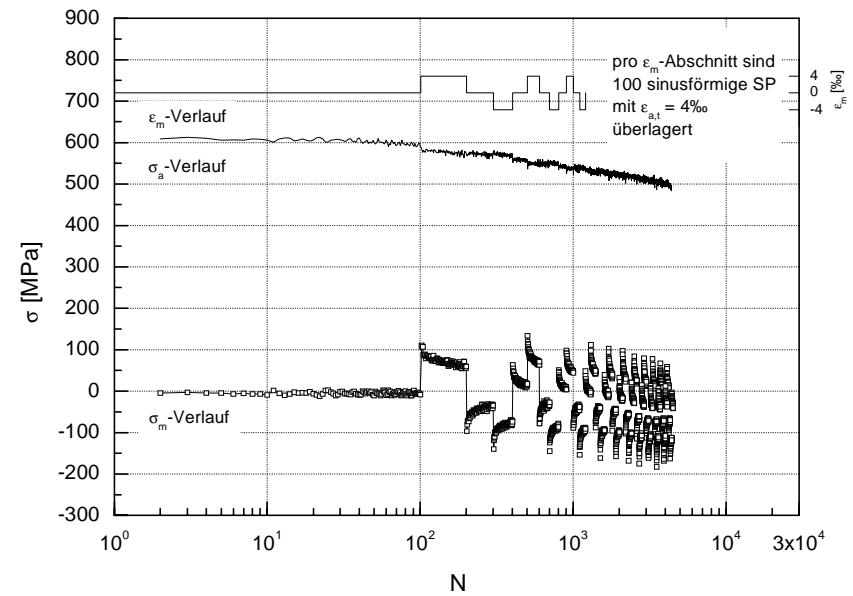


Abb. 68 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfab; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

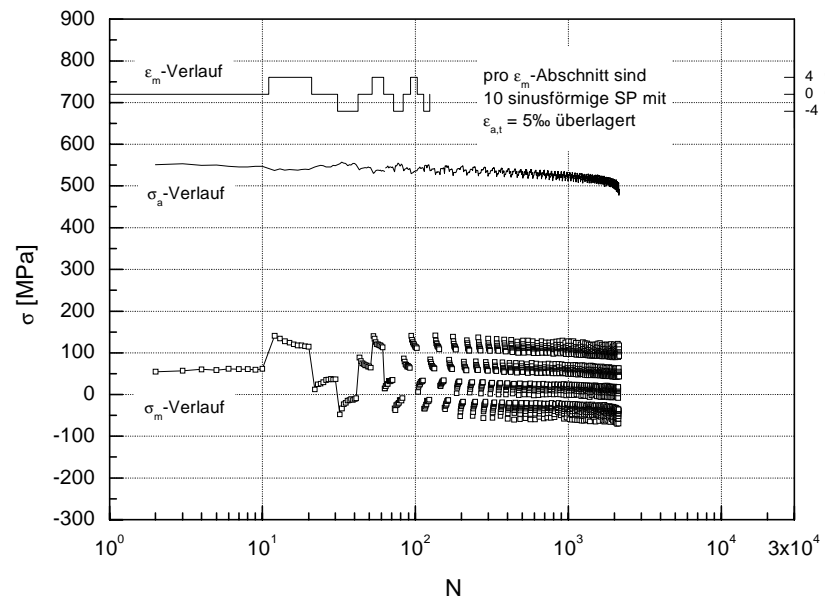


Abb. 69 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfbd; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 5\text{‰}$

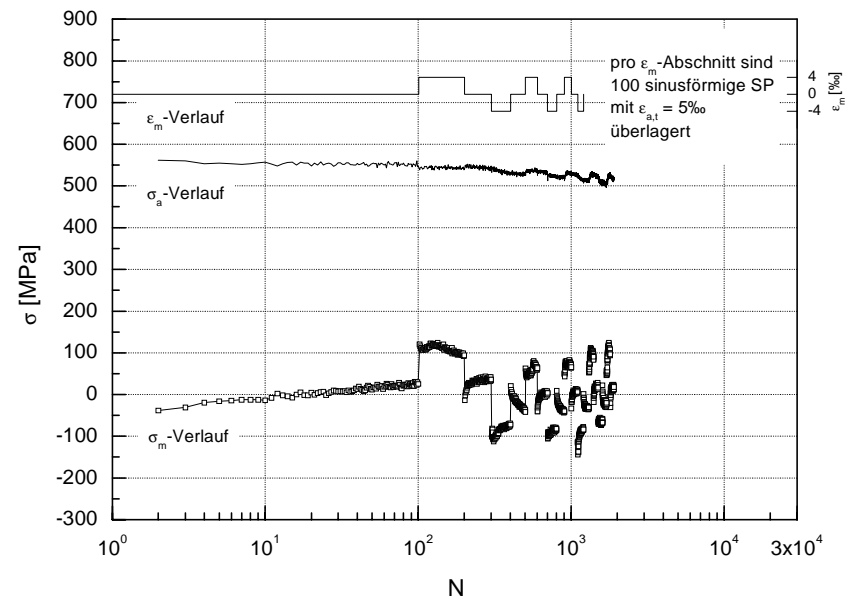


Abb. 70 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfbb; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -4; 0; +4\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 5\text{‰}$

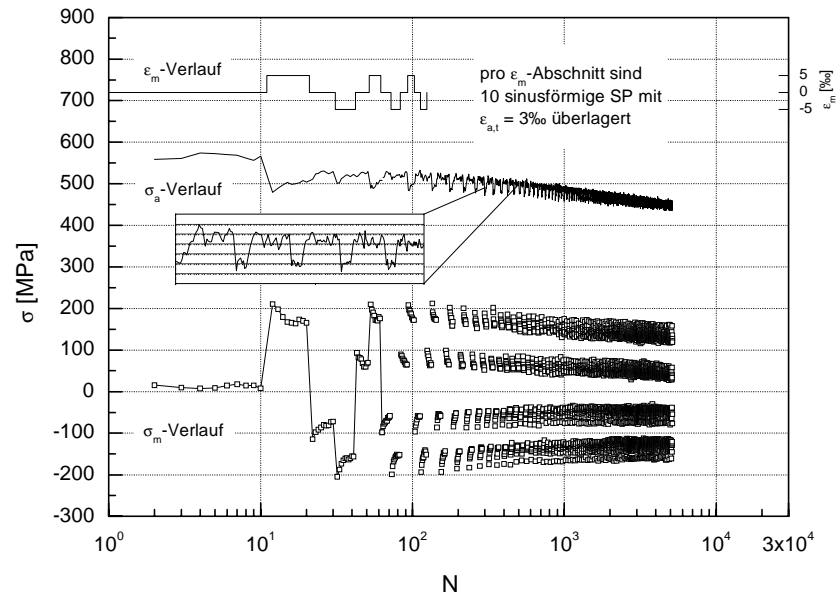


Abb. 71 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfgd; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -5; 0; +5\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

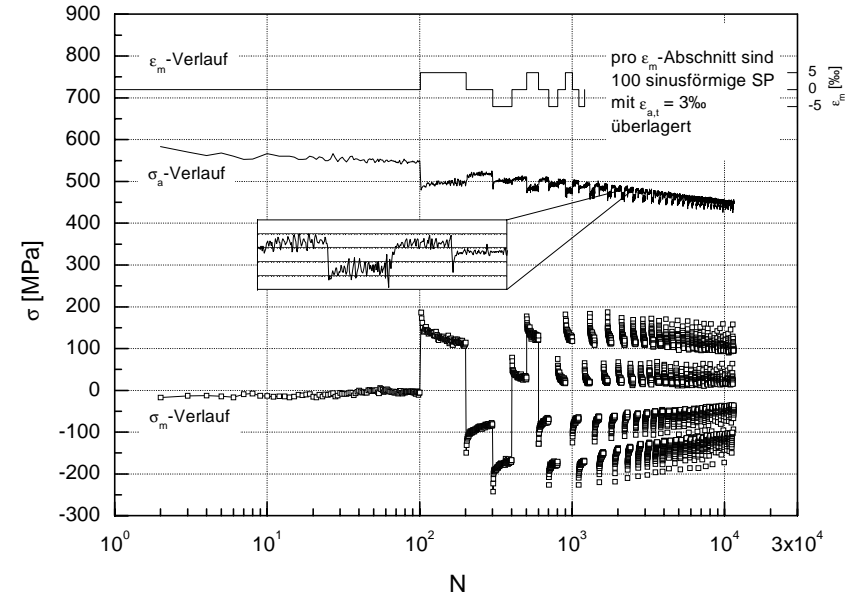


Abb. 72 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfgb; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -5; 0; +5\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 3\text{‰}$

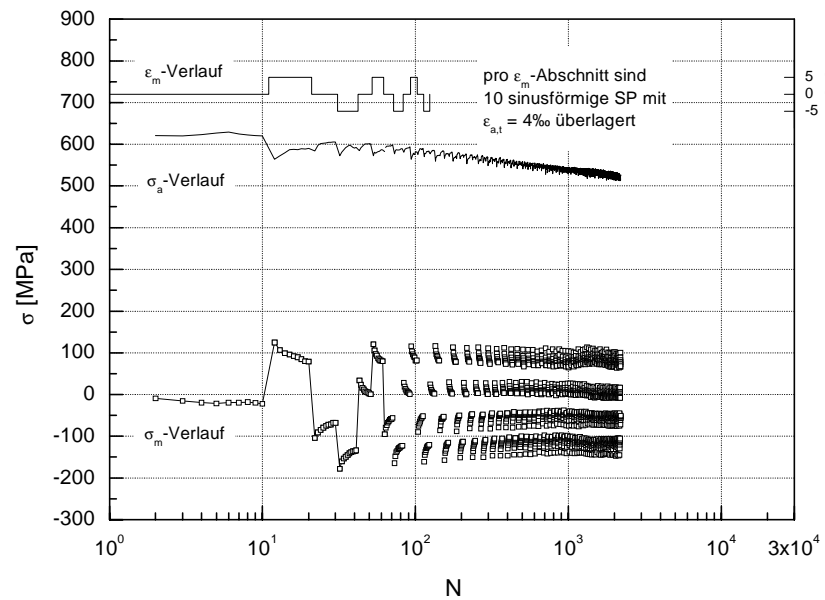


Abb. 73 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfhd; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -5; 0; +5\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

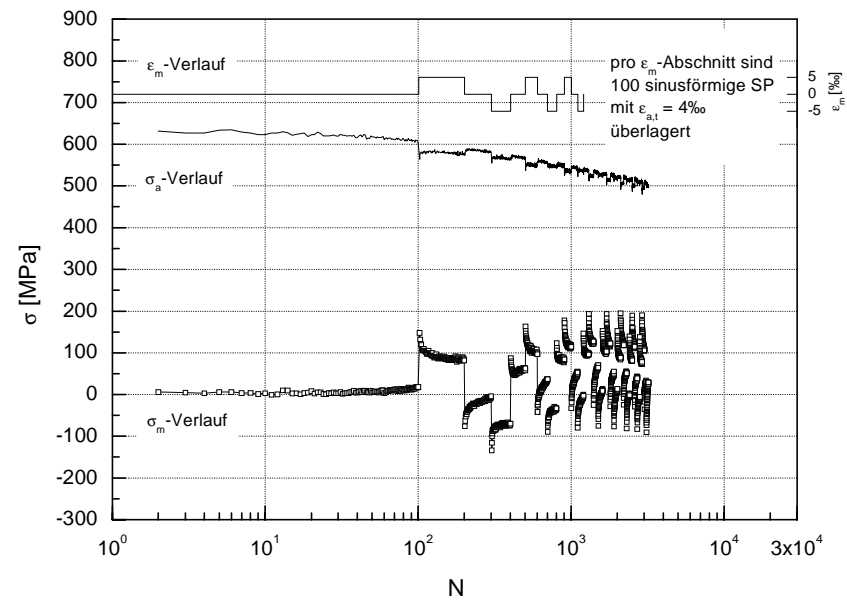


Abb. 74 Mittelspannung, Spannungsamplitude
Metasafe 900 flach; Lastfolge lfhb; ϵ -gesteuert
 $\epsilon_m = -5; 0; +5\text{‰}$; $\epsilon_{a,t} = 4\text{‰}$

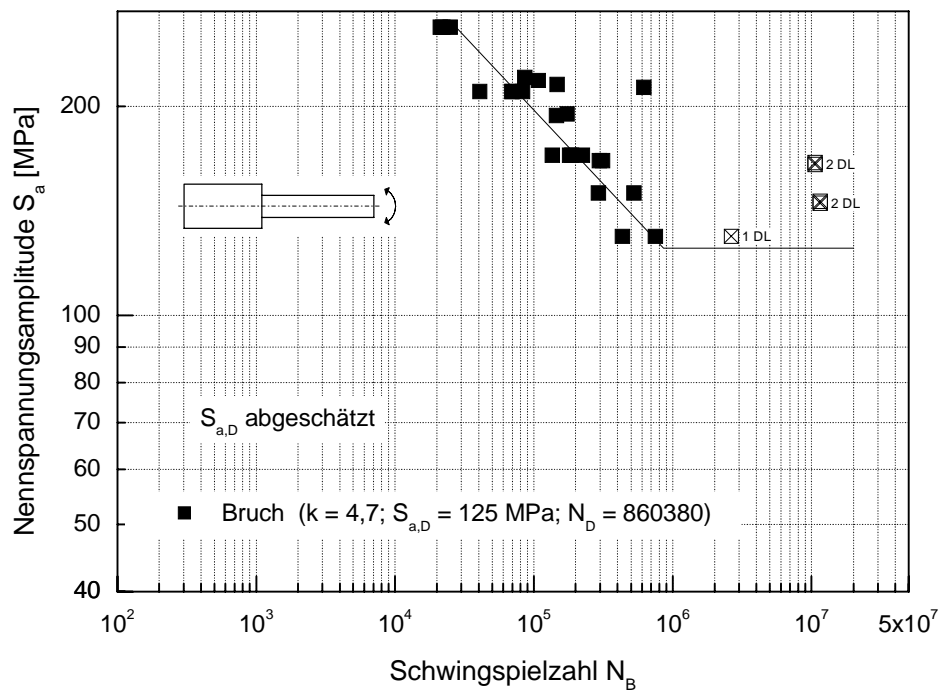


Abb. 75 Wöhlerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; $R = -1$

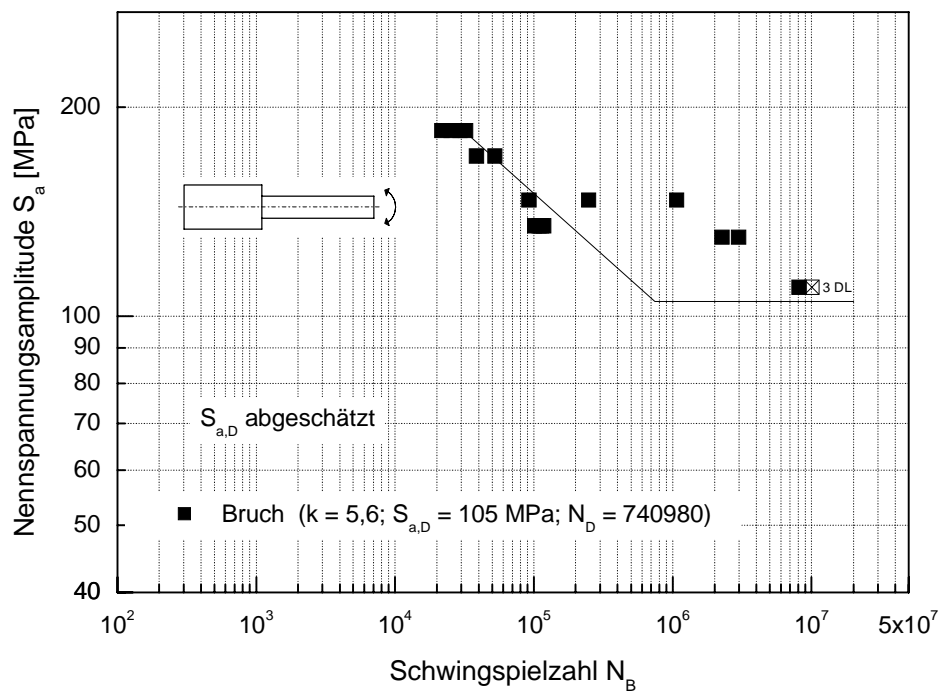


Abb. 76 Wöhlerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; $R = 0$

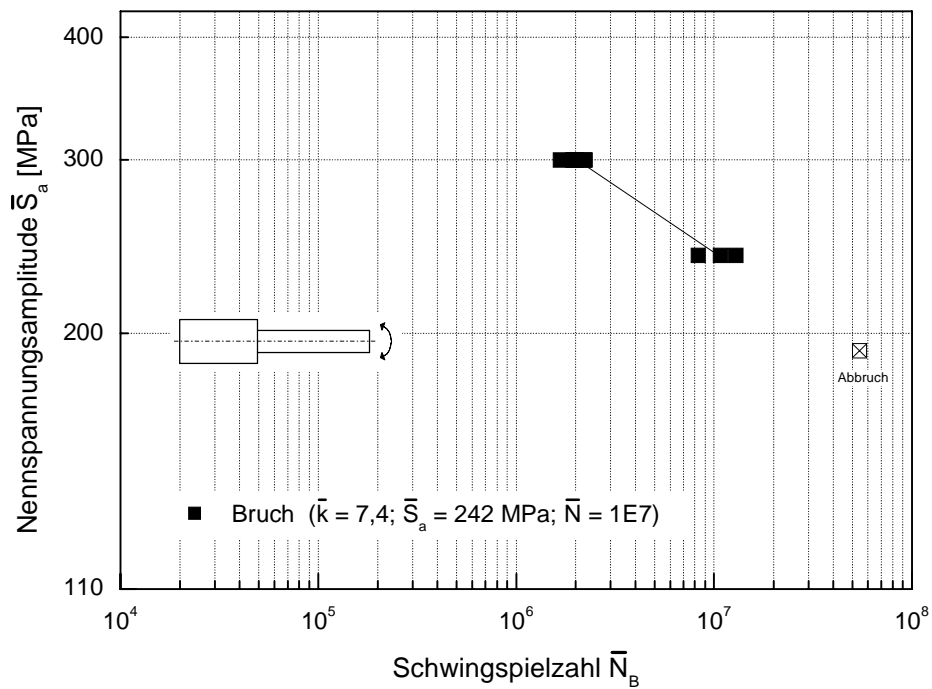


Abb. 77 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

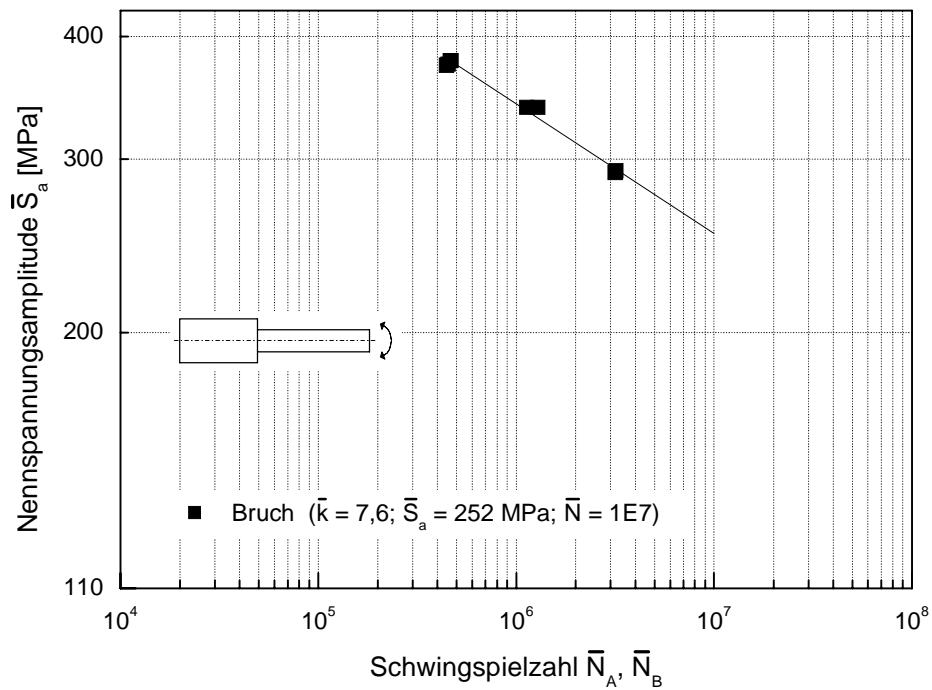


Abb. 78 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

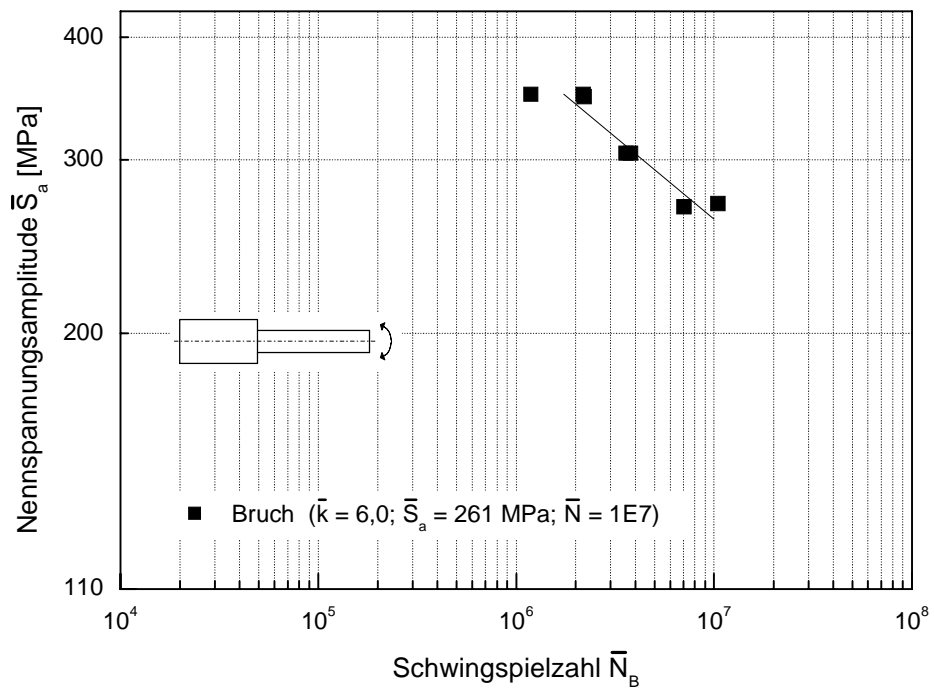


Abb. 79 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

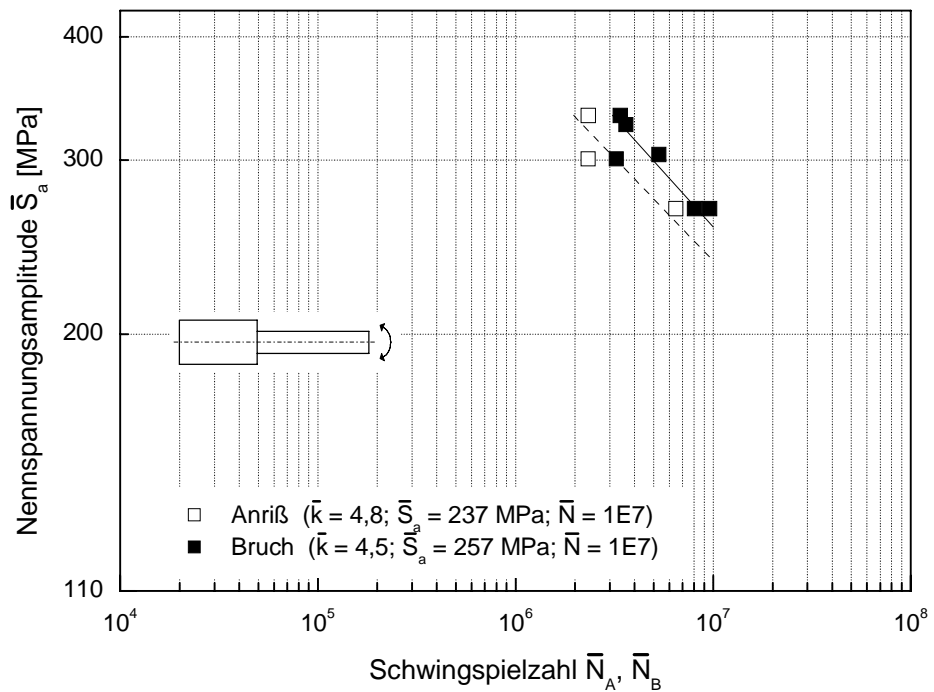


Abb. 80 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

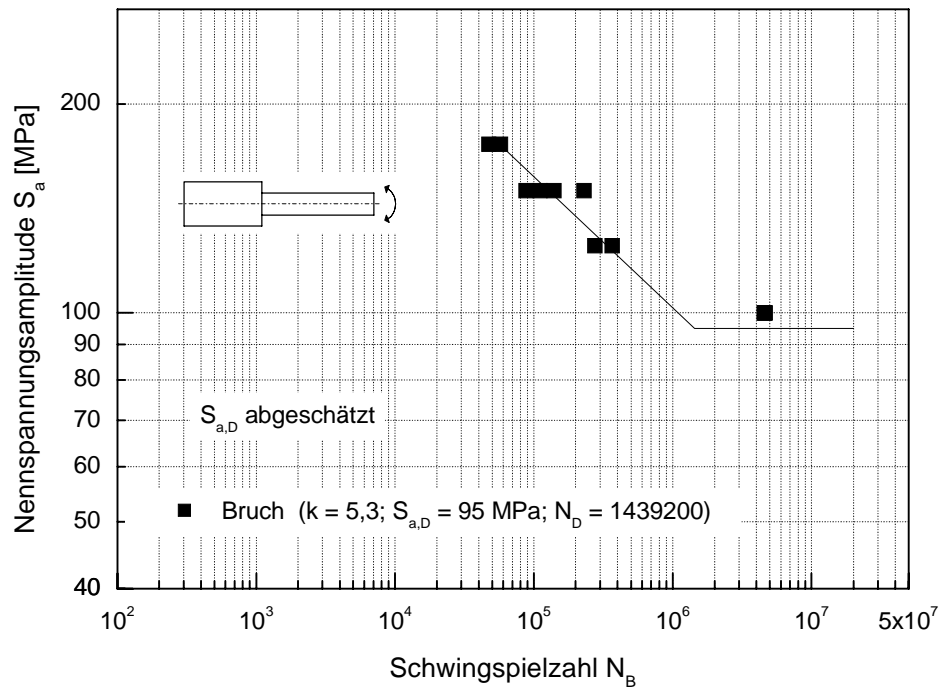


Abb. 81 Wöhlerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; $R = -1$

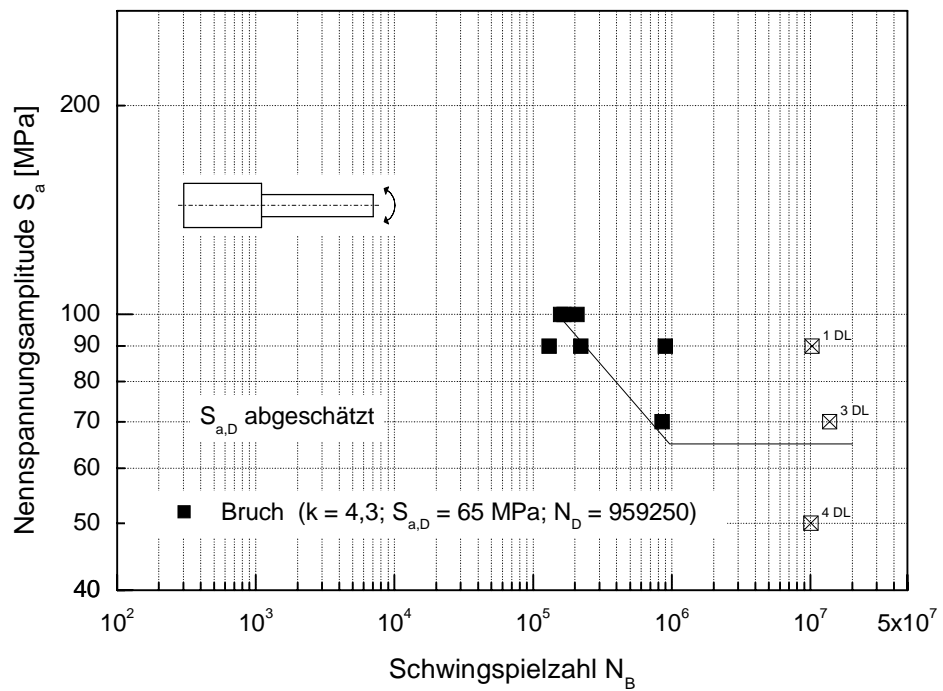


Abb. 82 Wöhlerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; $R = 0$

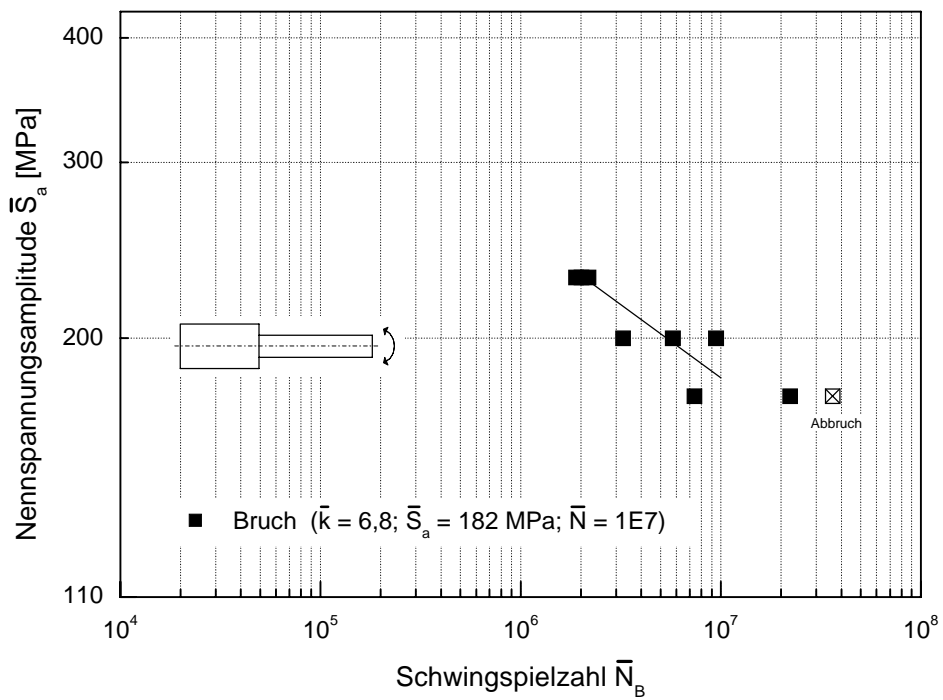


Abb. 83 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

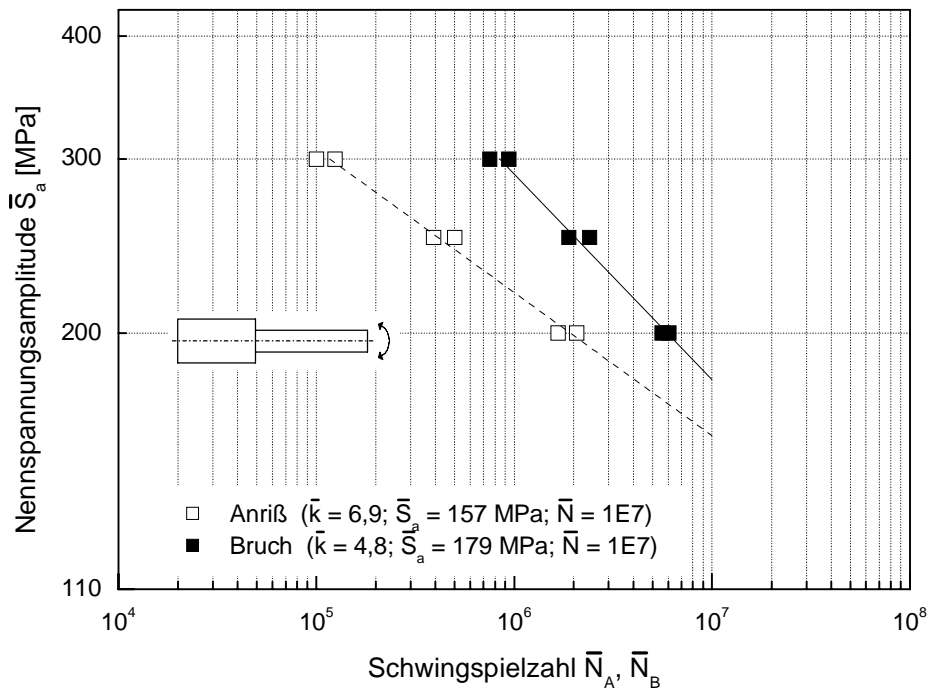


Abb. 84 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

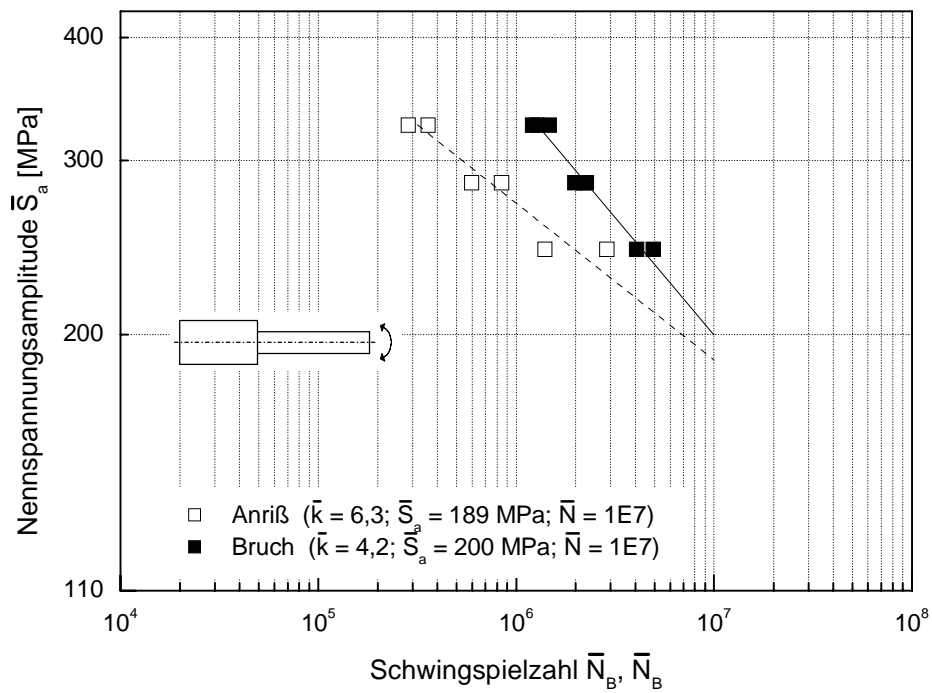


Abb. 85 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

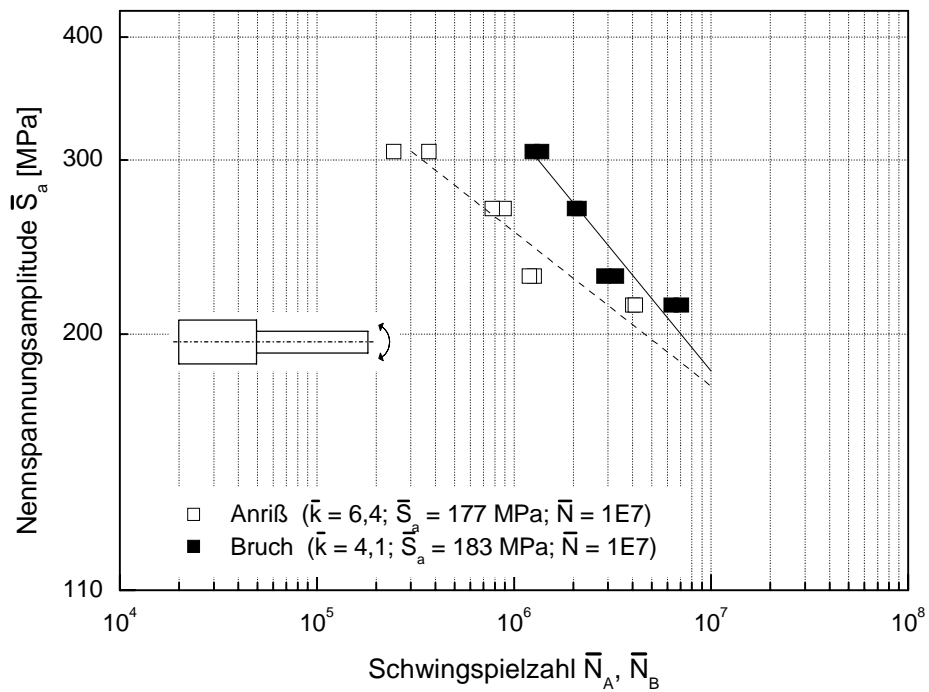


Abb. 86 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

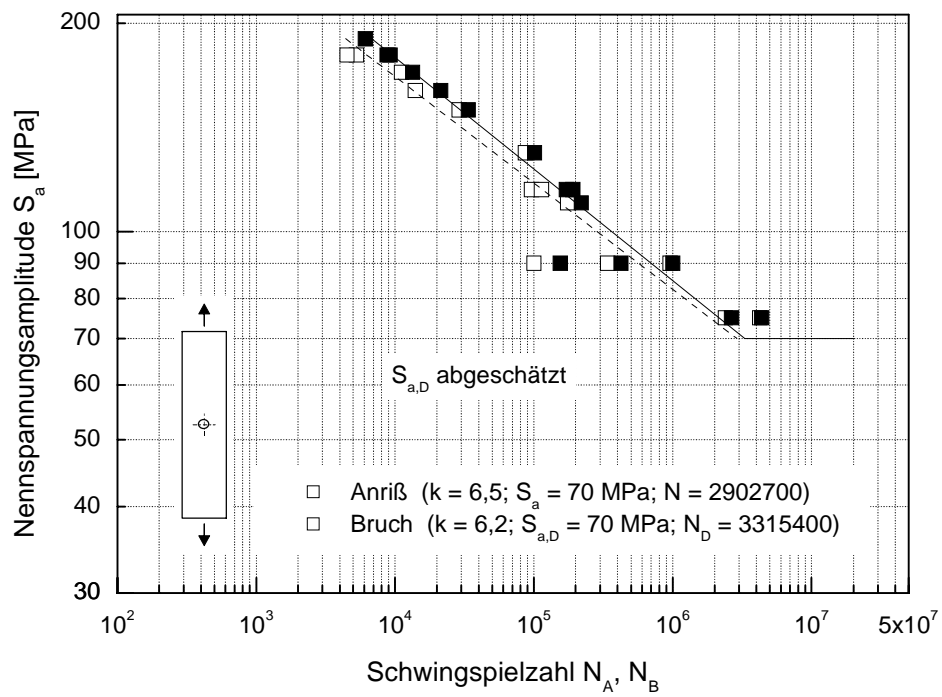


Abb. 87 Wöhlerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; $R = -1$

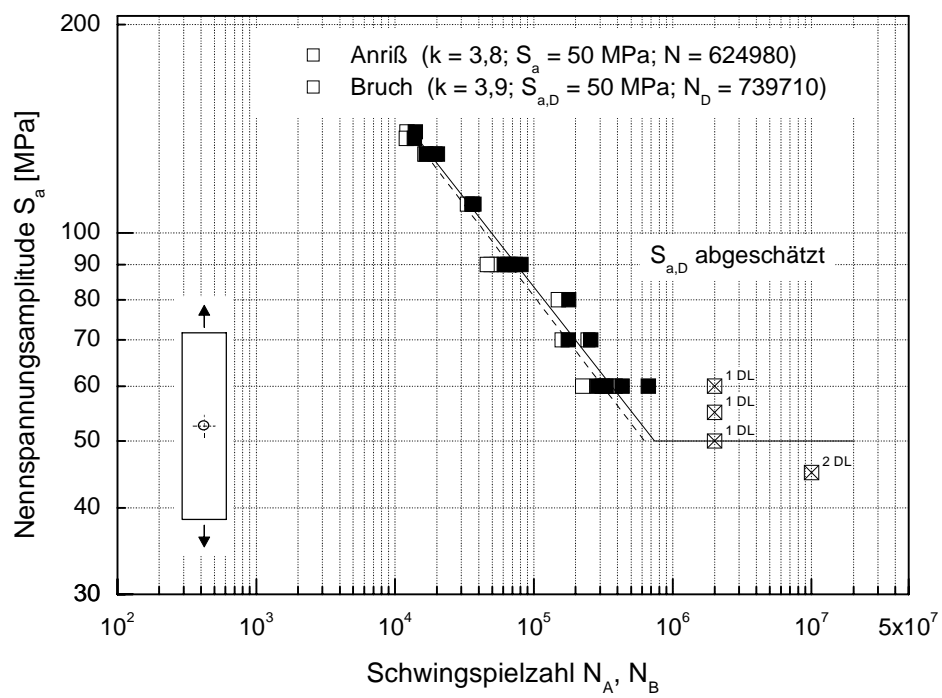


Abb. 88 Wöhlerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; $R = 0$

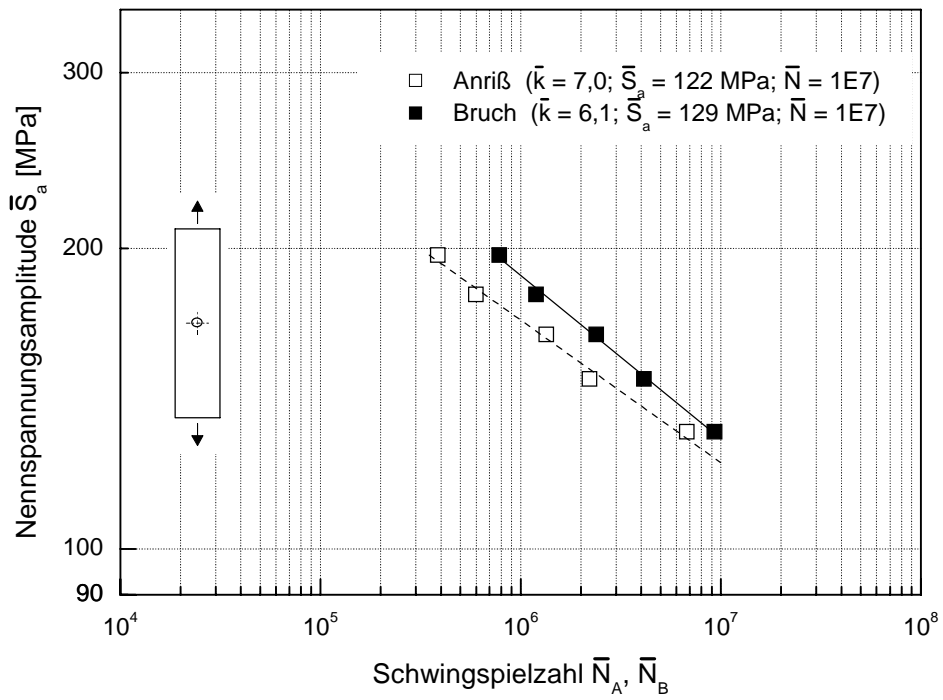


Abb. 89 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

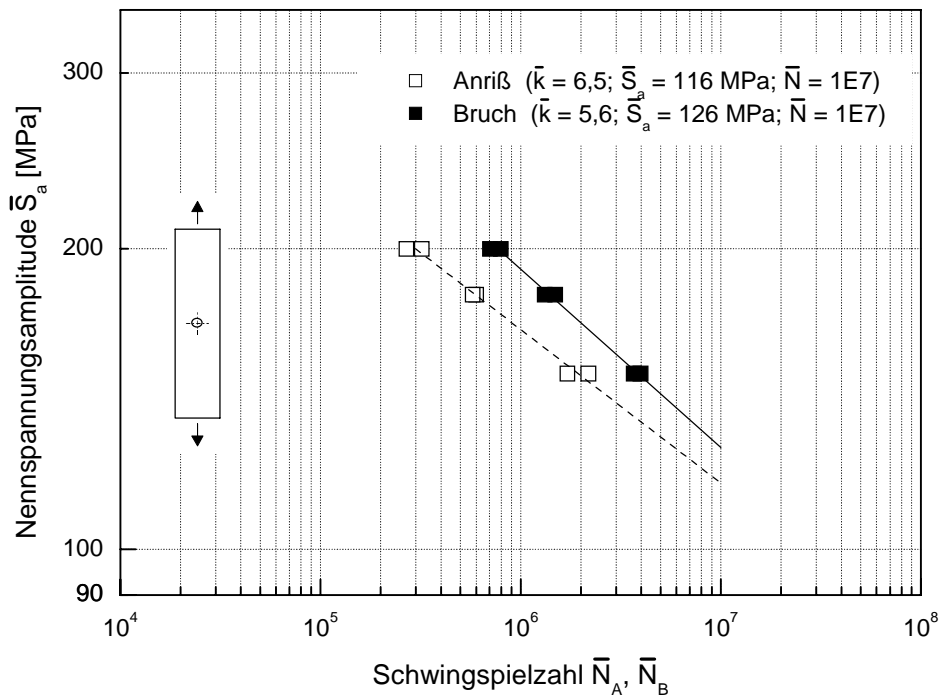


Abb. 90 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

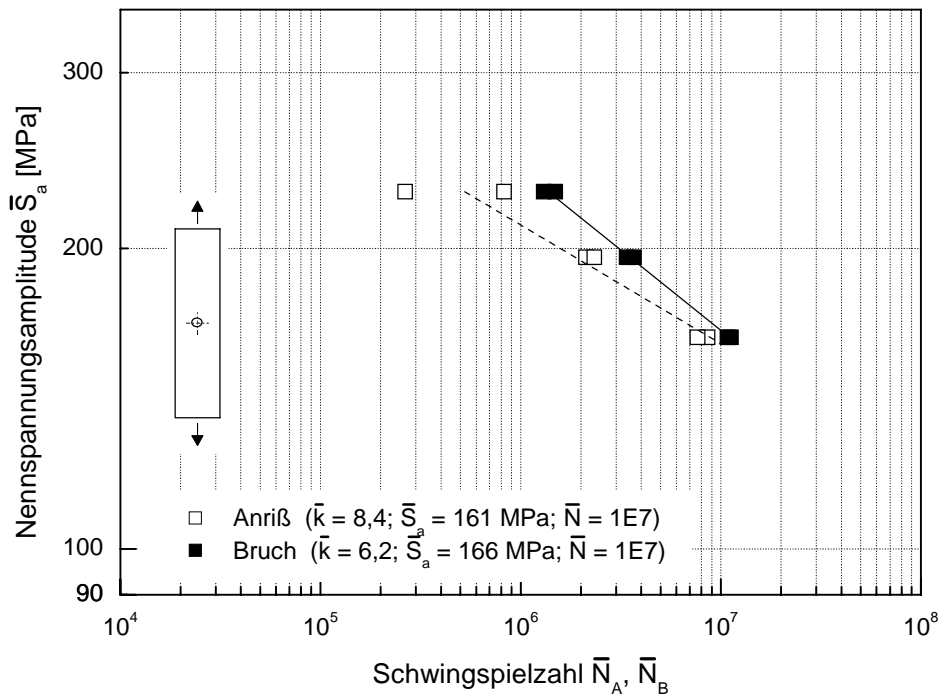


Abb. 91 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

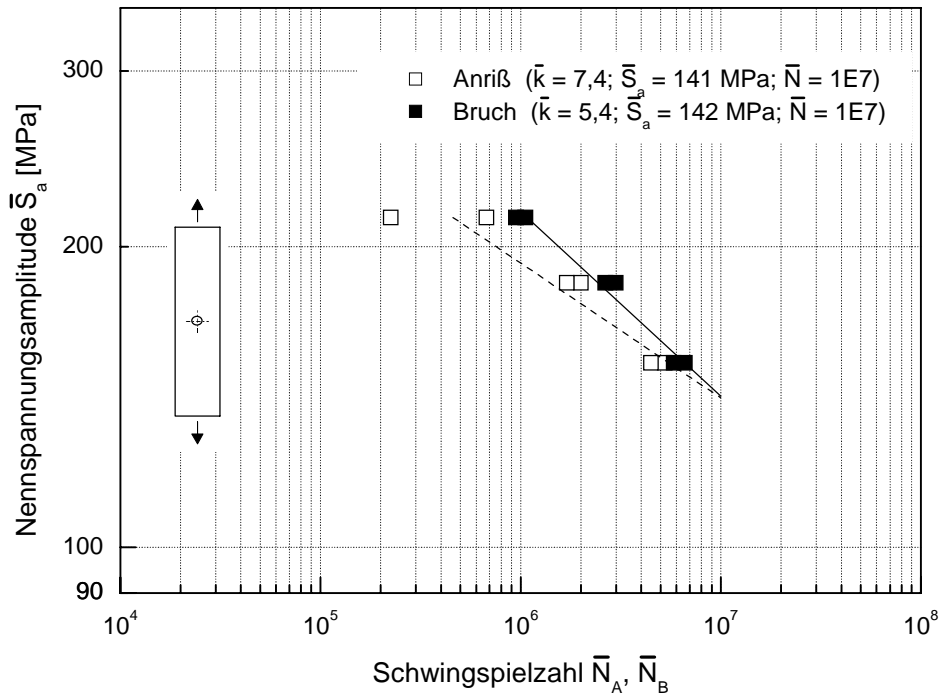


Abb. 92 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

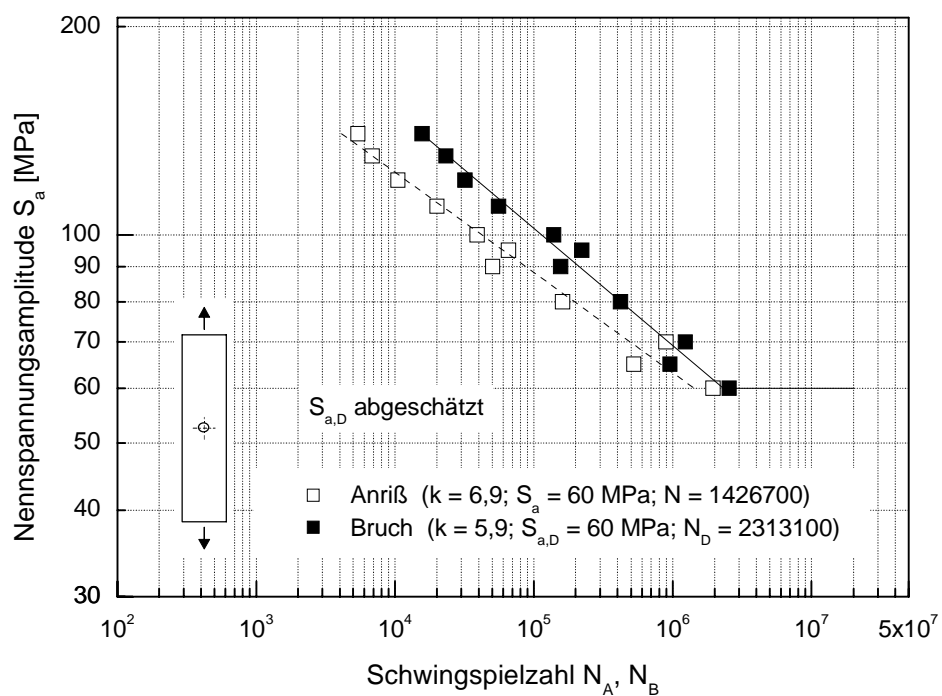


Abb. 93 Wöhlerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; $R = -1$

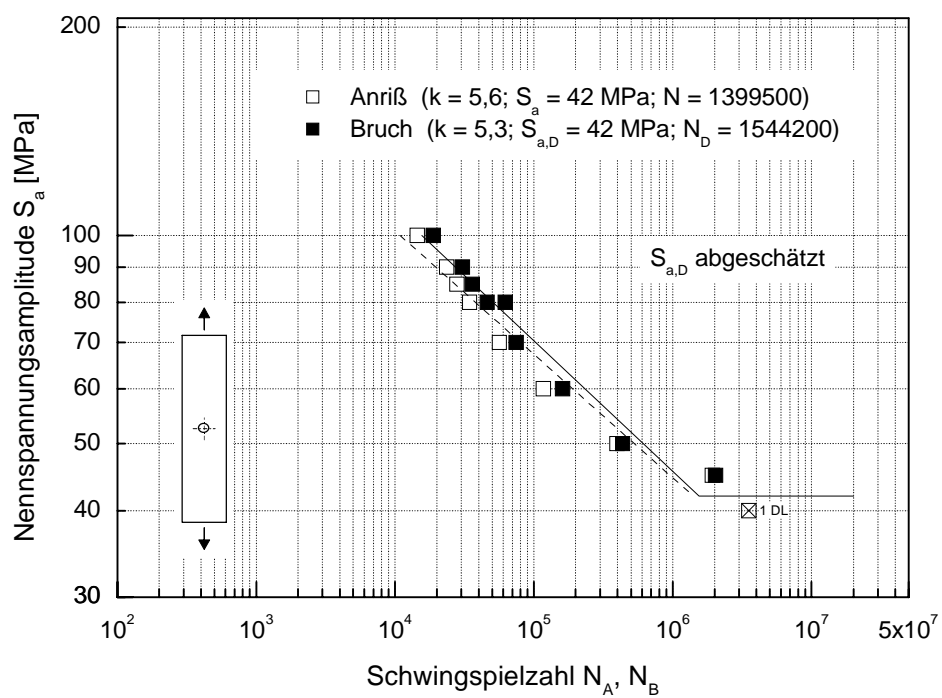


Abb. 94 Wöhlerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; $R = 0$

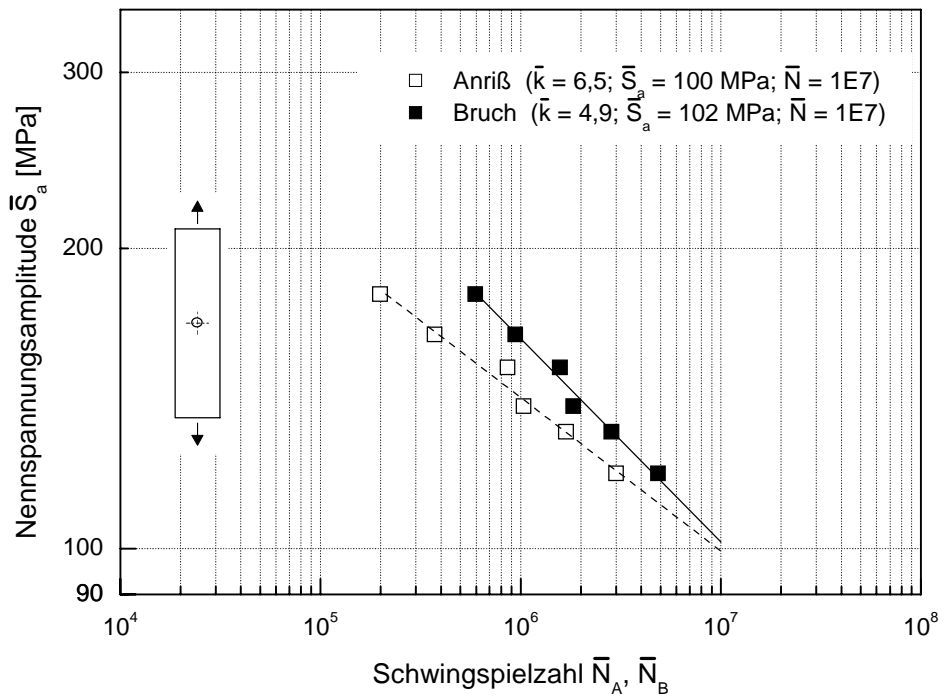


Abb. 95 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

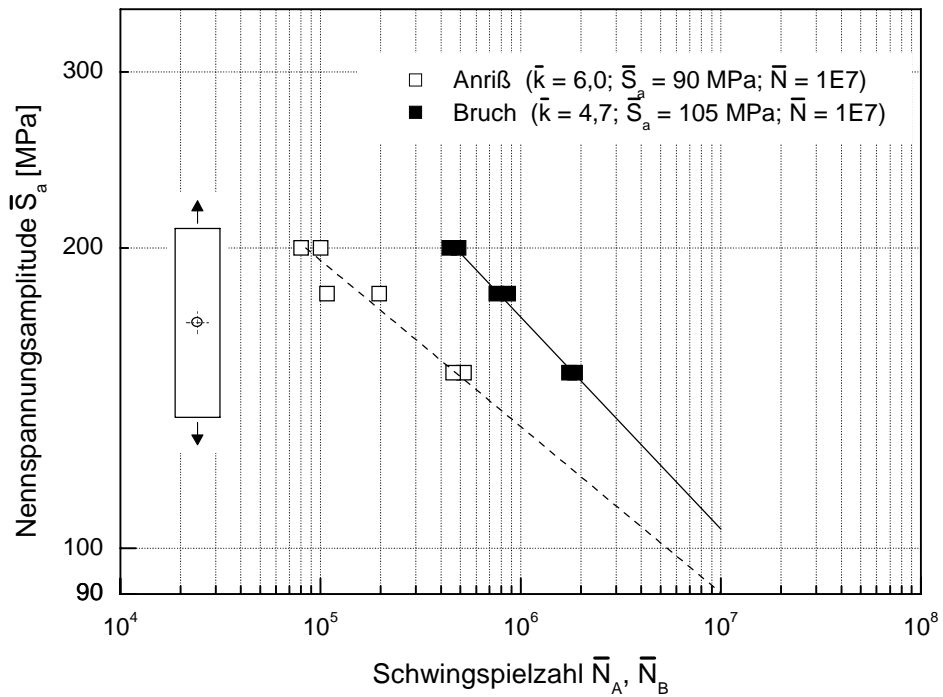


Abb. 96 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

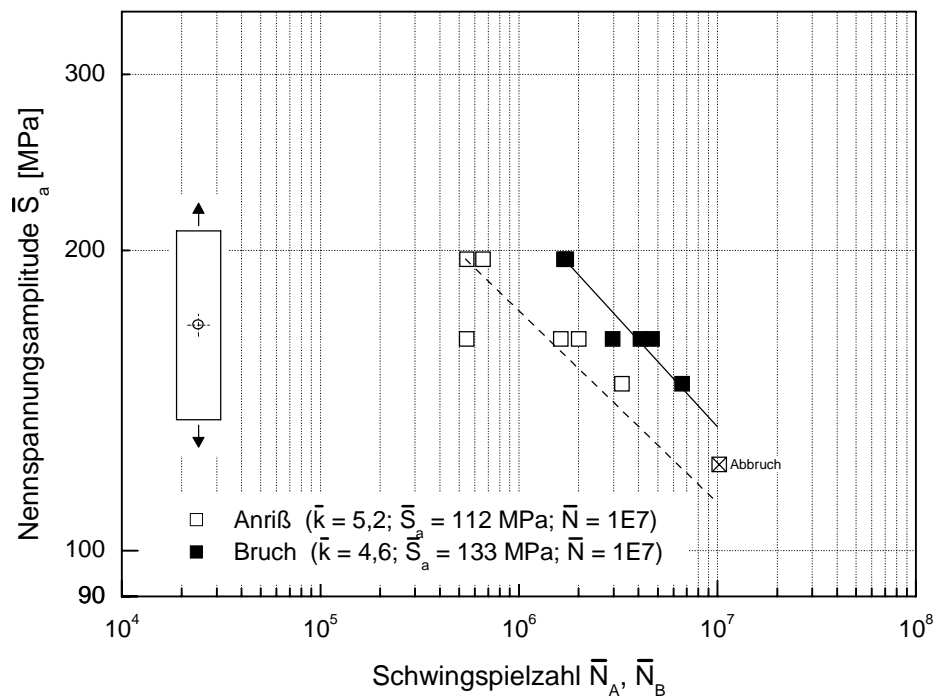


Abb. 97 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

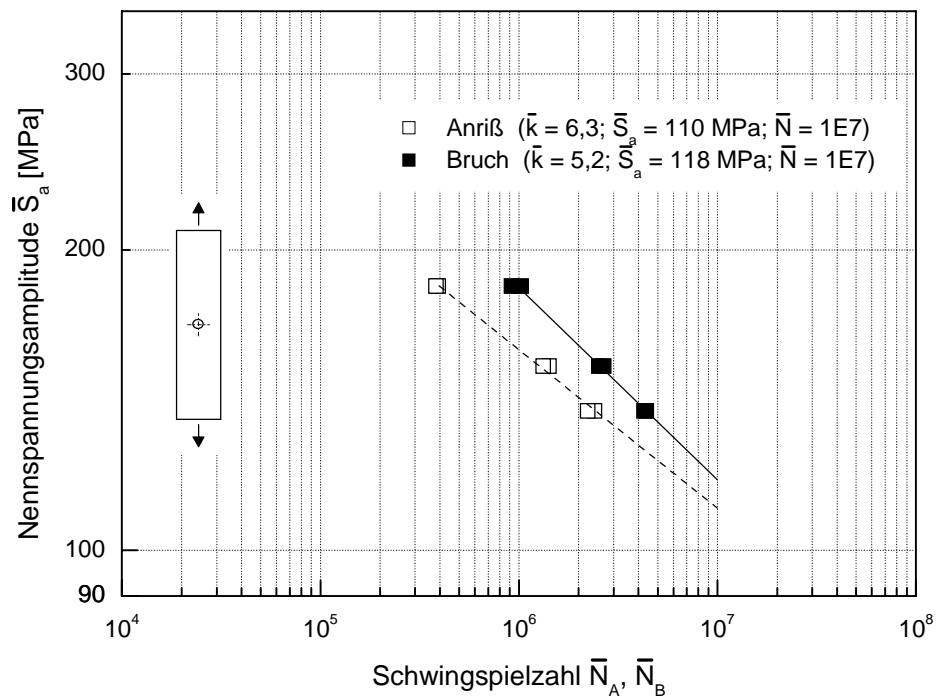


Abb. 98 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

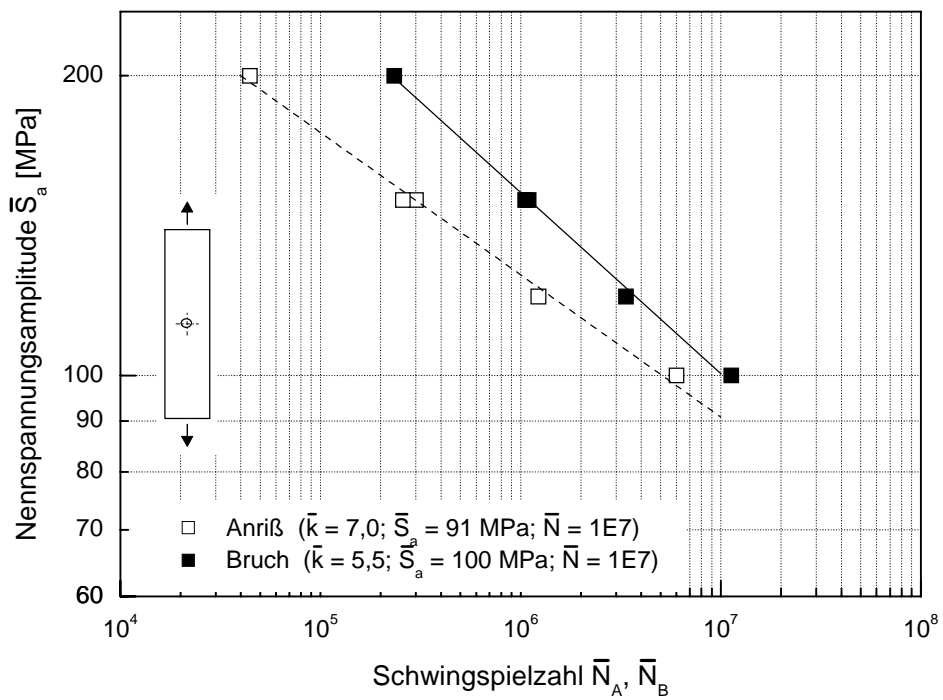


Abb. 99 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; Lastfolge LF1-1; $\bar{R} = -1$

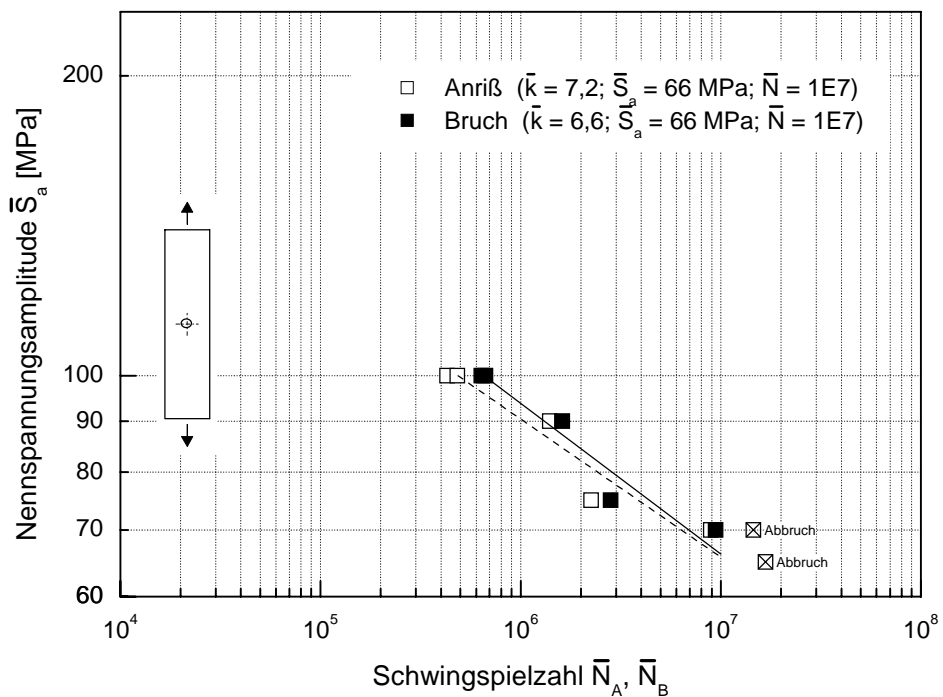


Abb. 100 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; Lastfolge LF1-0; $\bar{R} = 0$

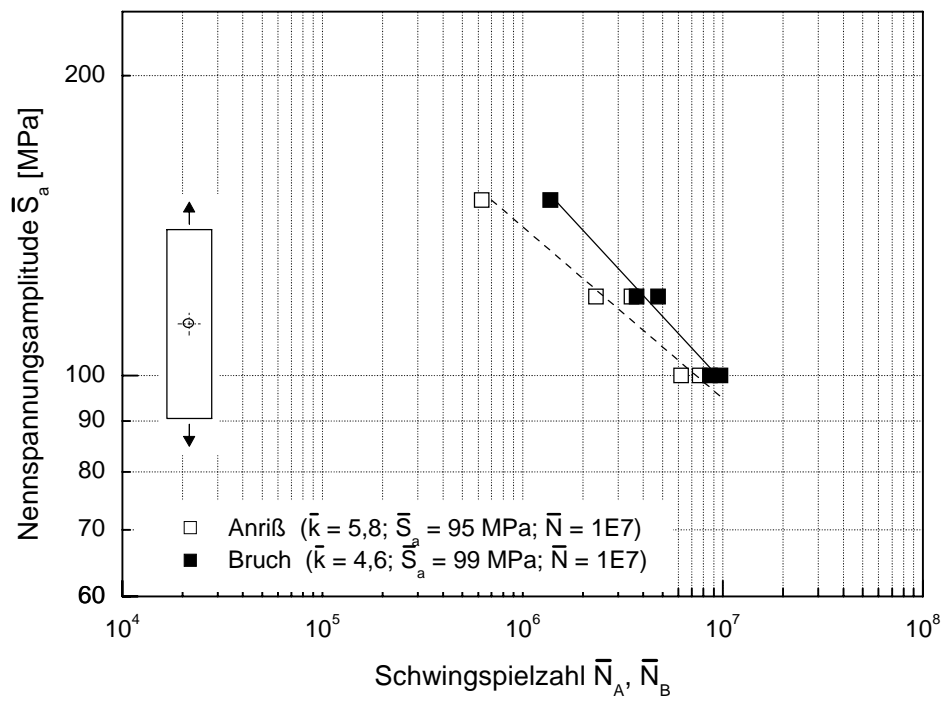


Abb. 101 Lebensdauerlinie AlCuMg2; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; Lastfolge LF3; $\bar{R} = -1$

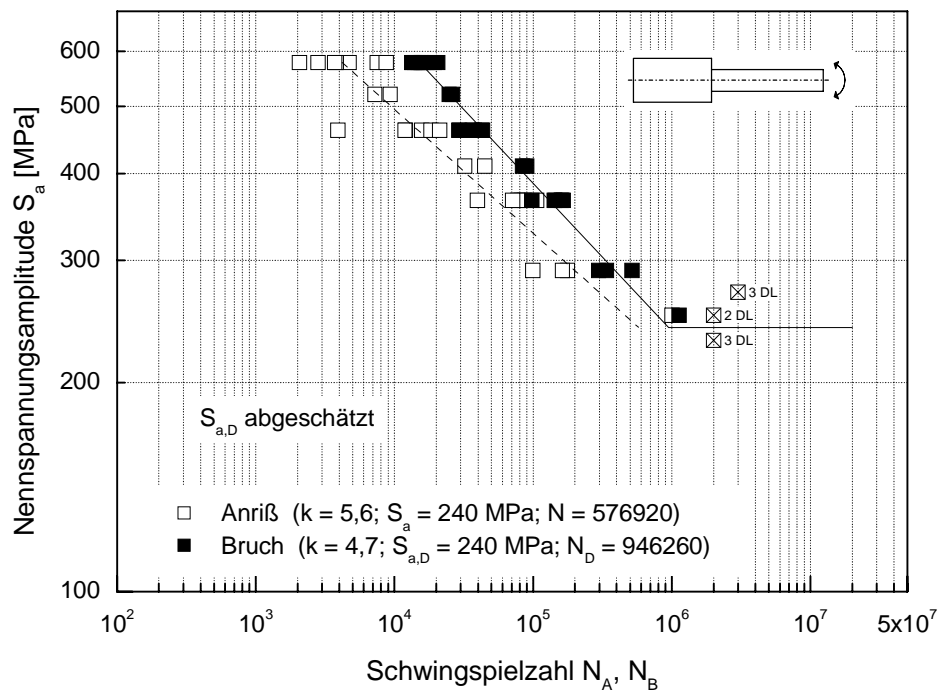


Abb. 102 Wöhlerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; $R = -1$

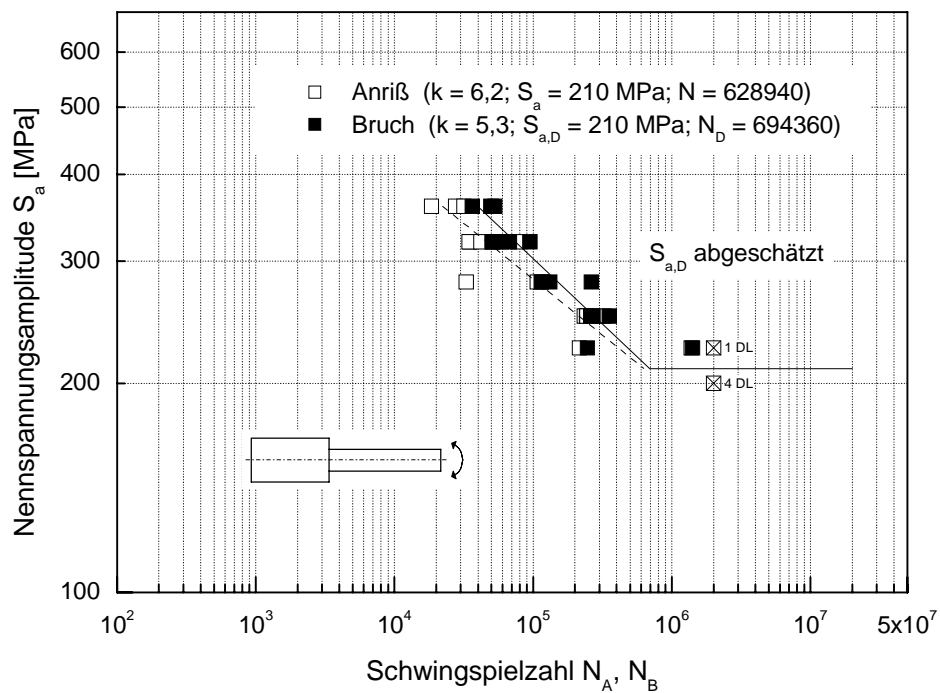


Abb. 103 Wöhlerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; $R = 0$

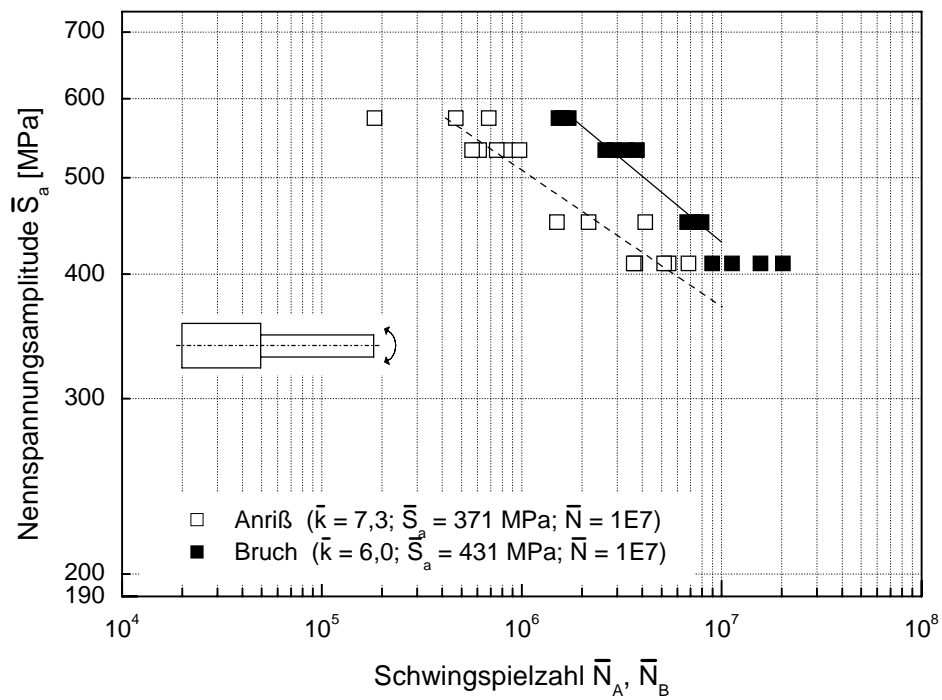


Abb. 104 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

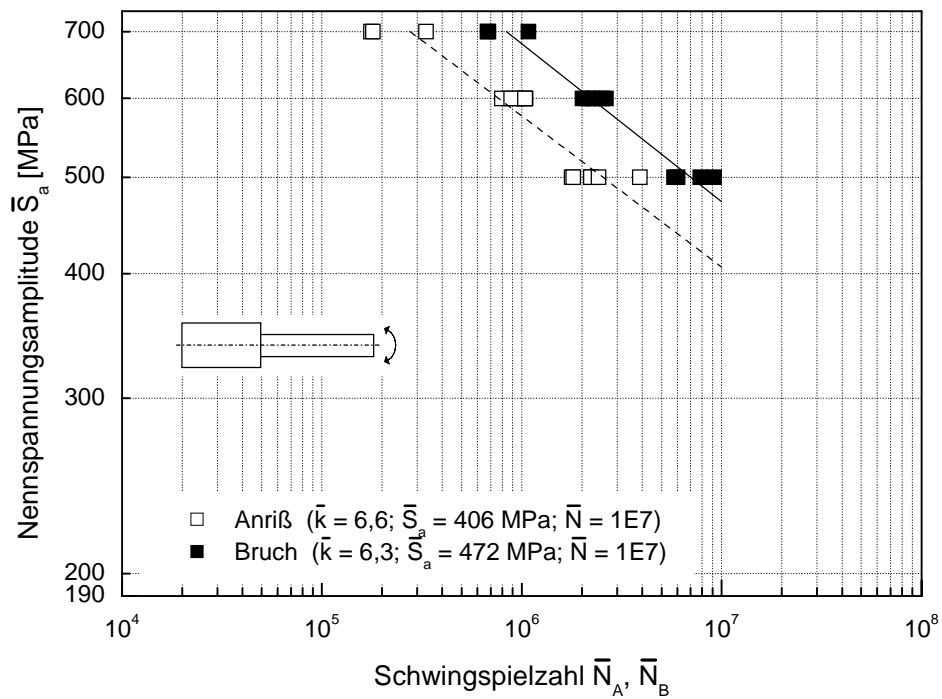


Abb. 105 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

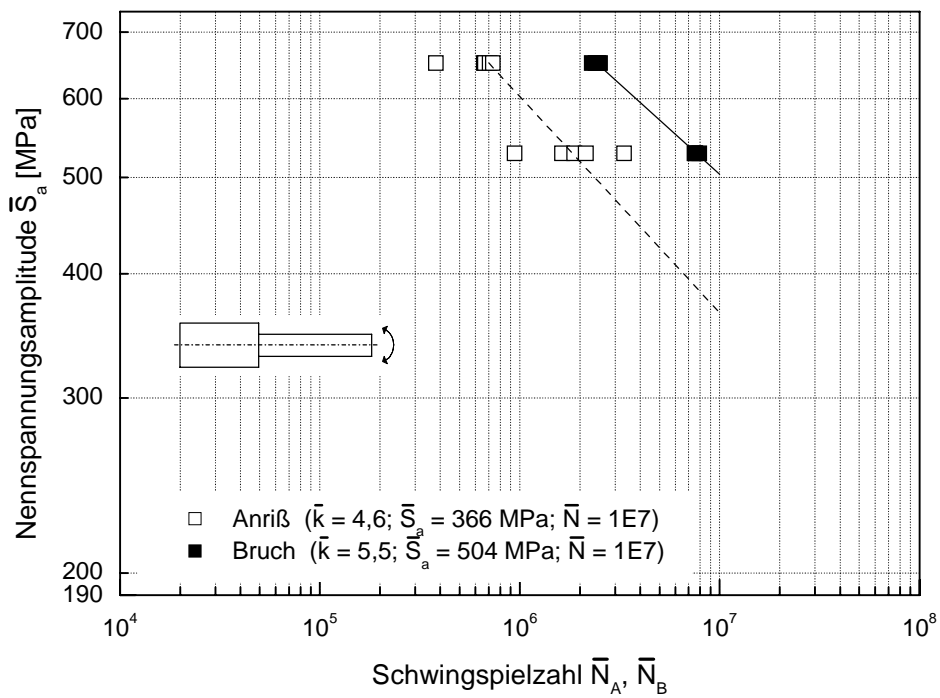


Abb. 106 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

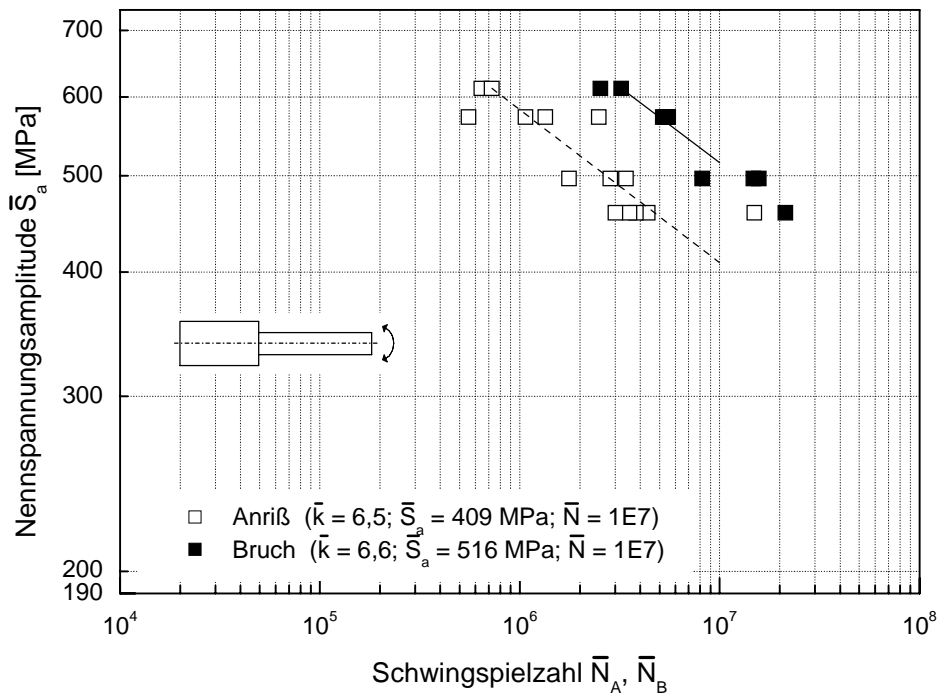


Abb. 107 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 1,5$; Planbiegung; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

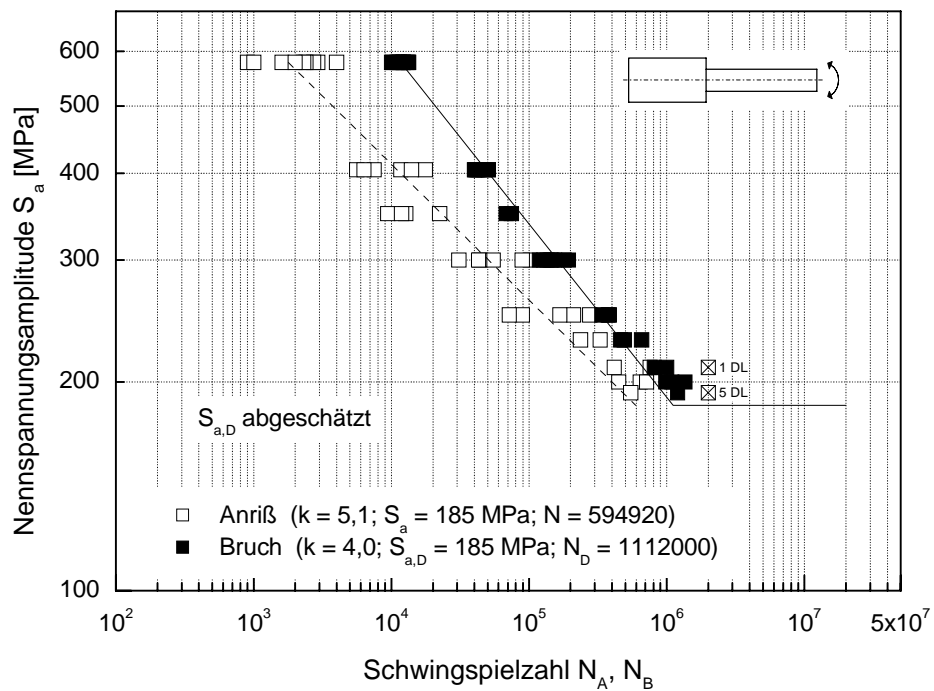


Abb. 108 Wöhlerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; $R = -1$

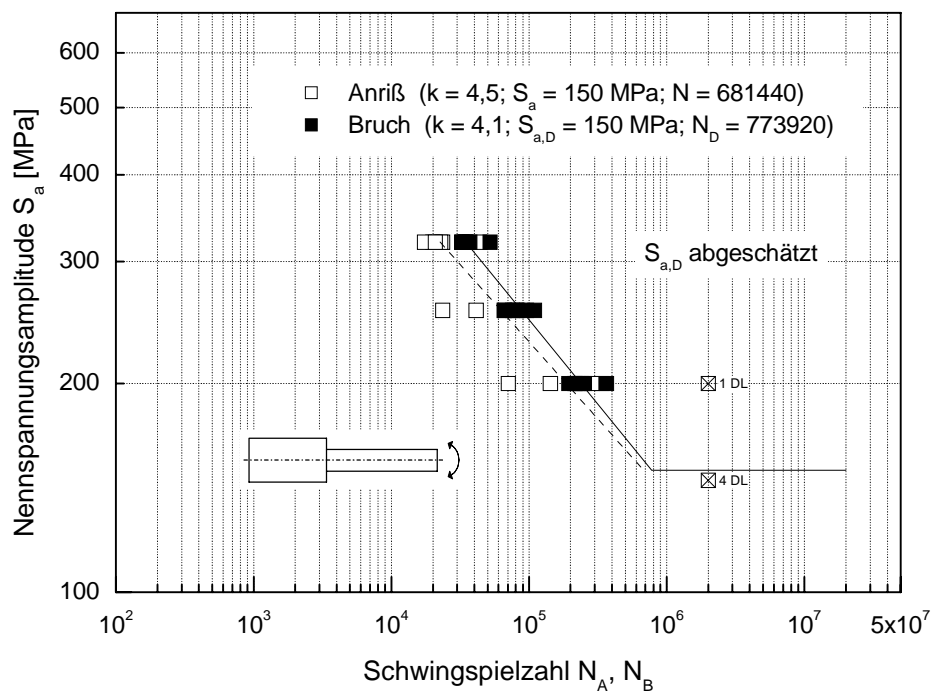


Abb. 109 Wöhlerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; $R = 0$

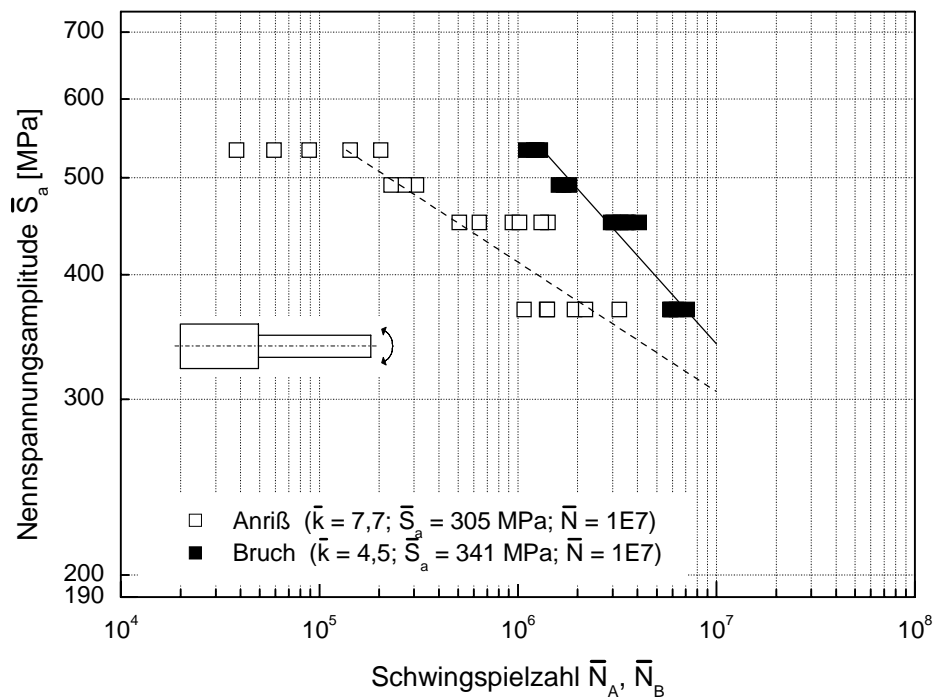


Abb. 110 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

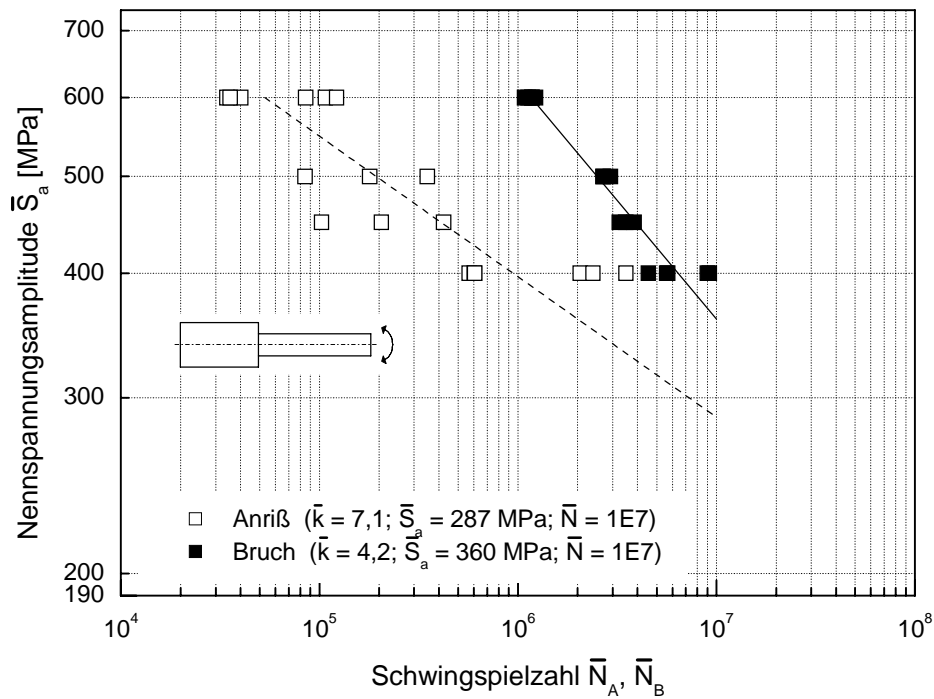


Abb. 111 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

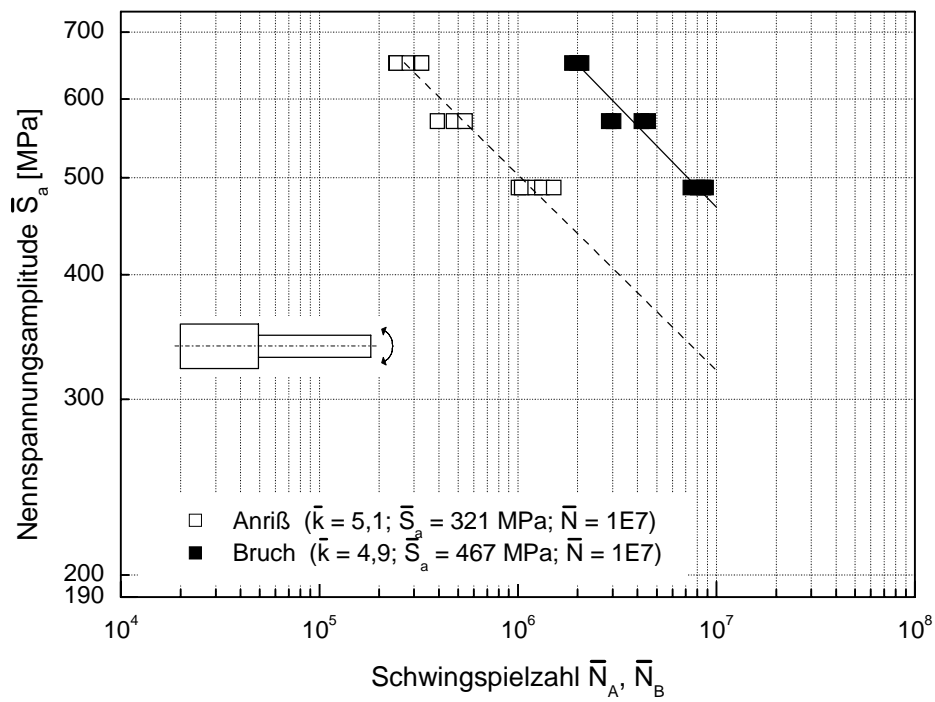


Abb. 112 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

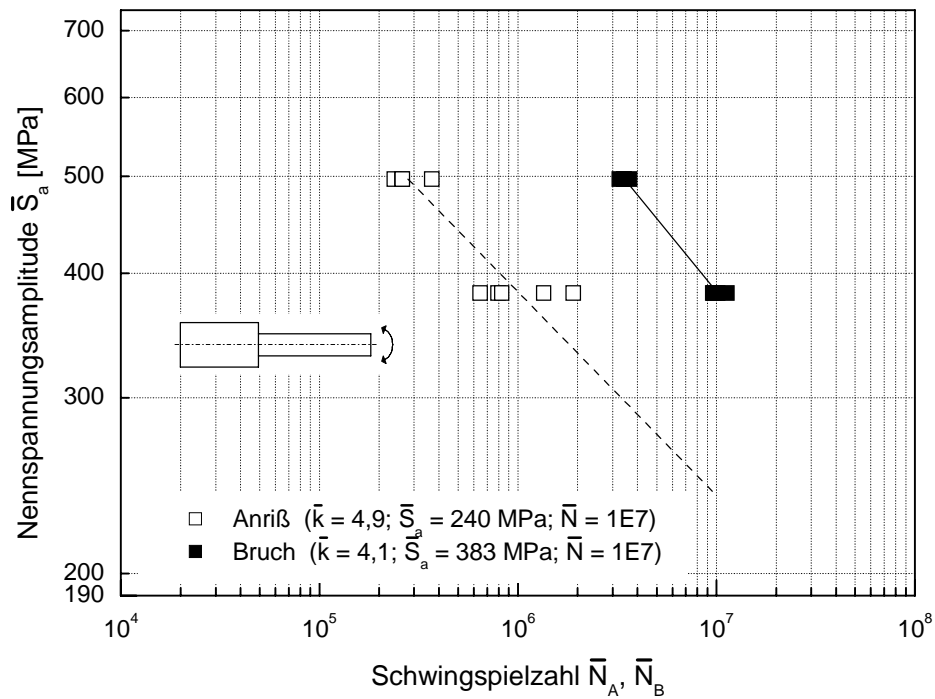


Abb. 113 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Rundprobe $K_t = 2,2$; Planbiegung; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

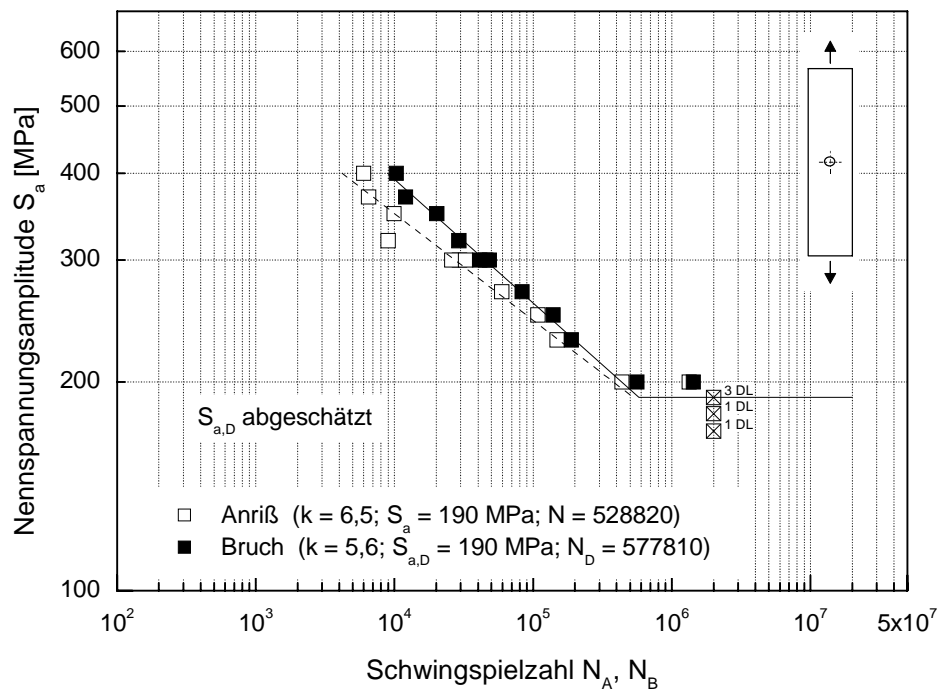


Abb. 114 Wöhlerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; $R = -1$

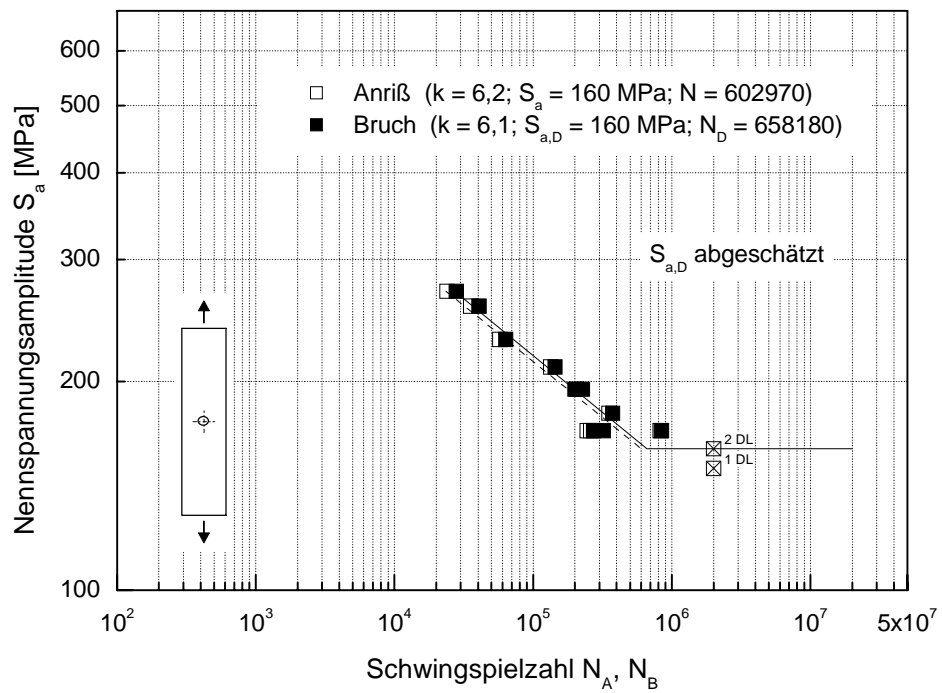


Abb. 115 Wöhlerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; $R = 0$

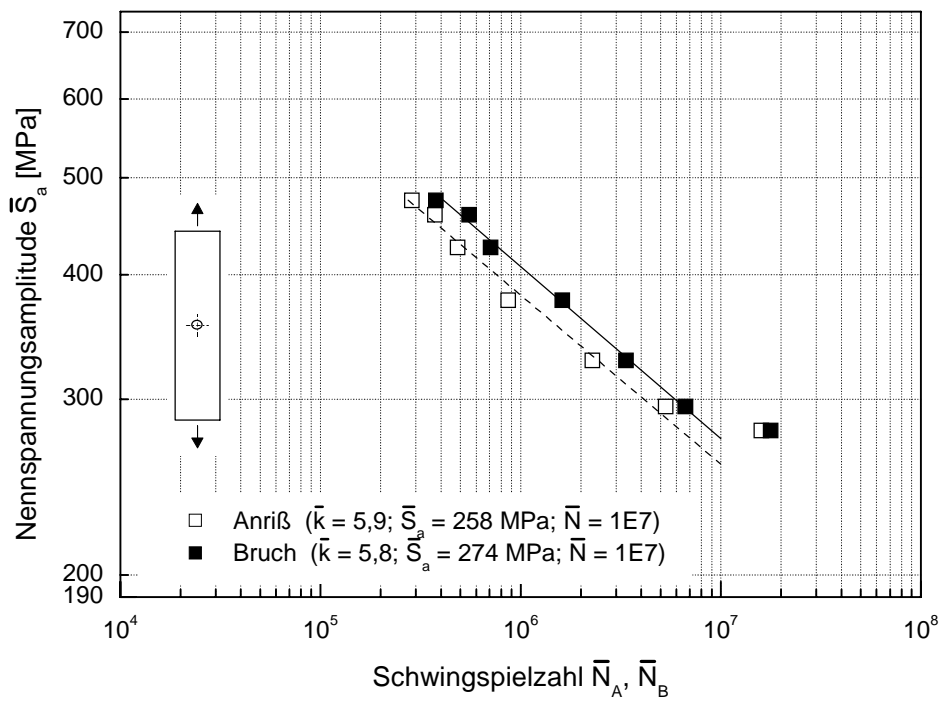


Abb. 116 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

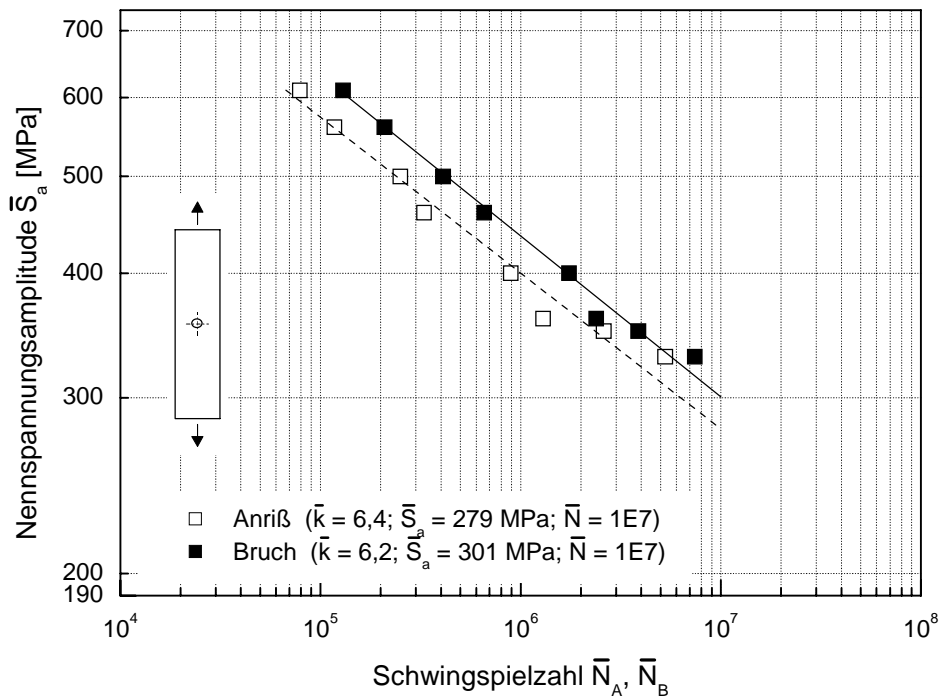


Abb. 117 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

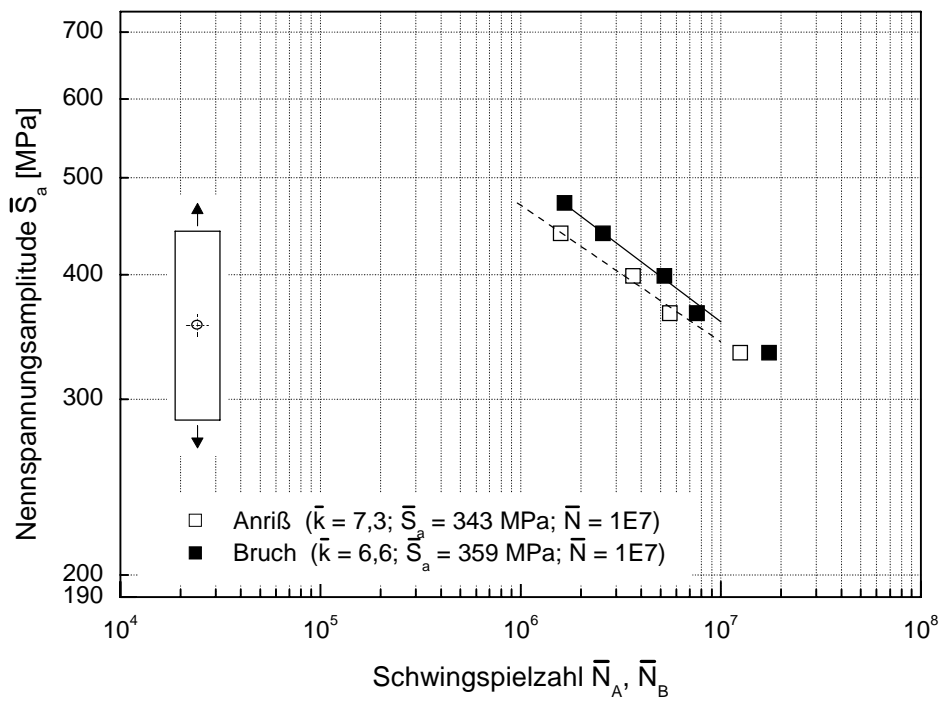


Abb. 118 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

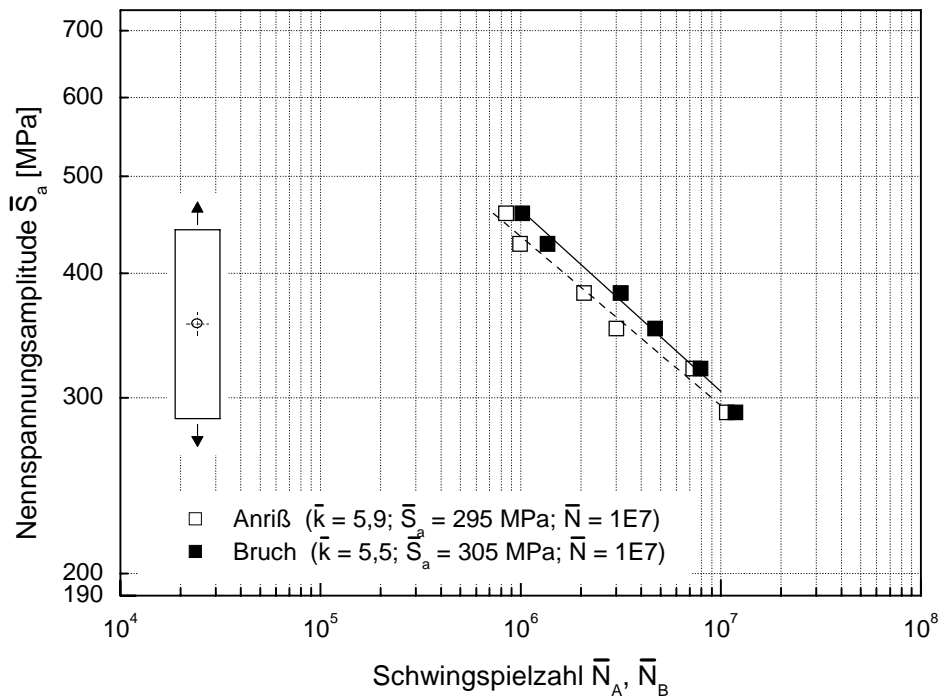


Abb. 119 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 2,5$; Zug-Druck; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

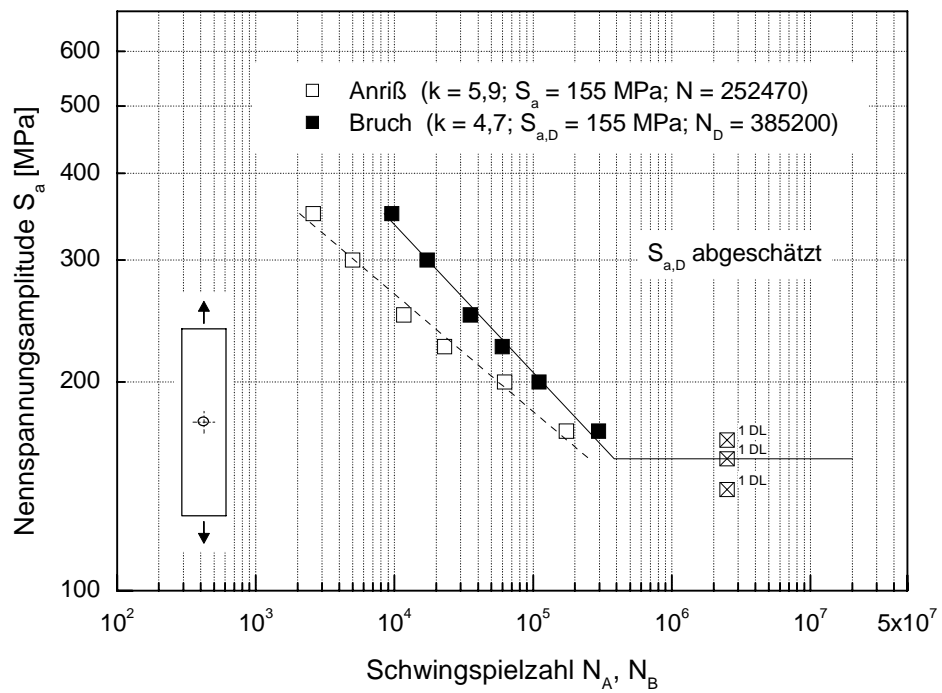


Abb. 120 Wöhlerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; $R = -1$

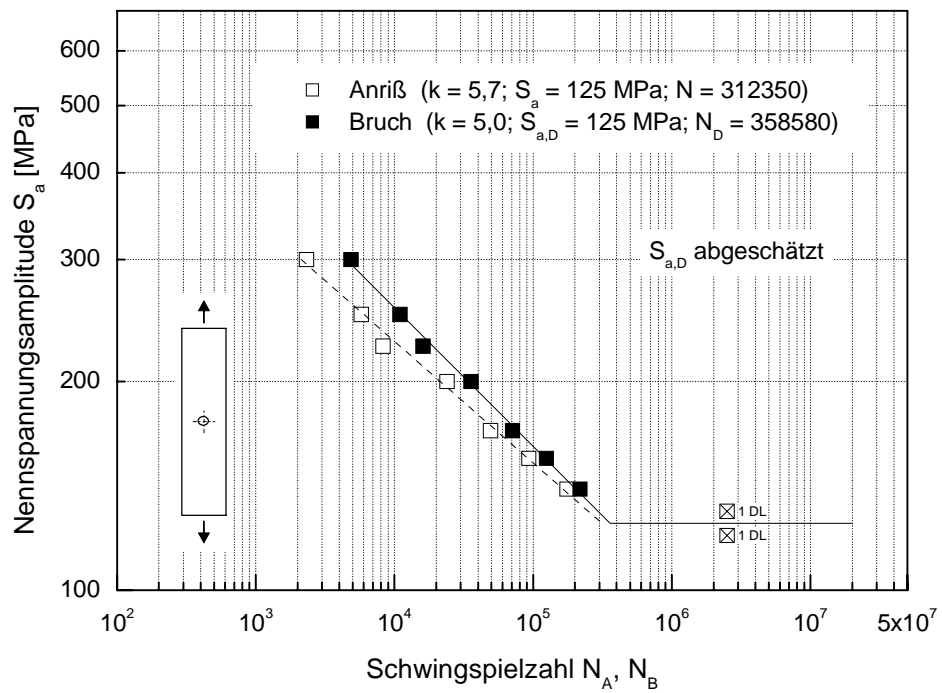


Abb. 121 Wöhlerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; $R = 0$

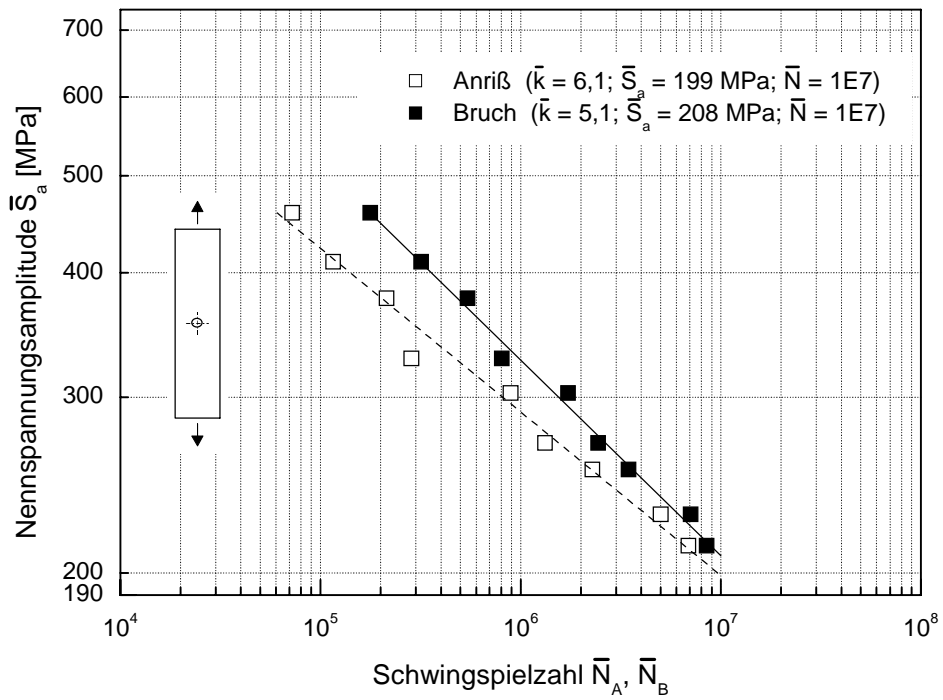


Abb. 122 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; CARLOS-V0; $\bar{R} = -0,64$

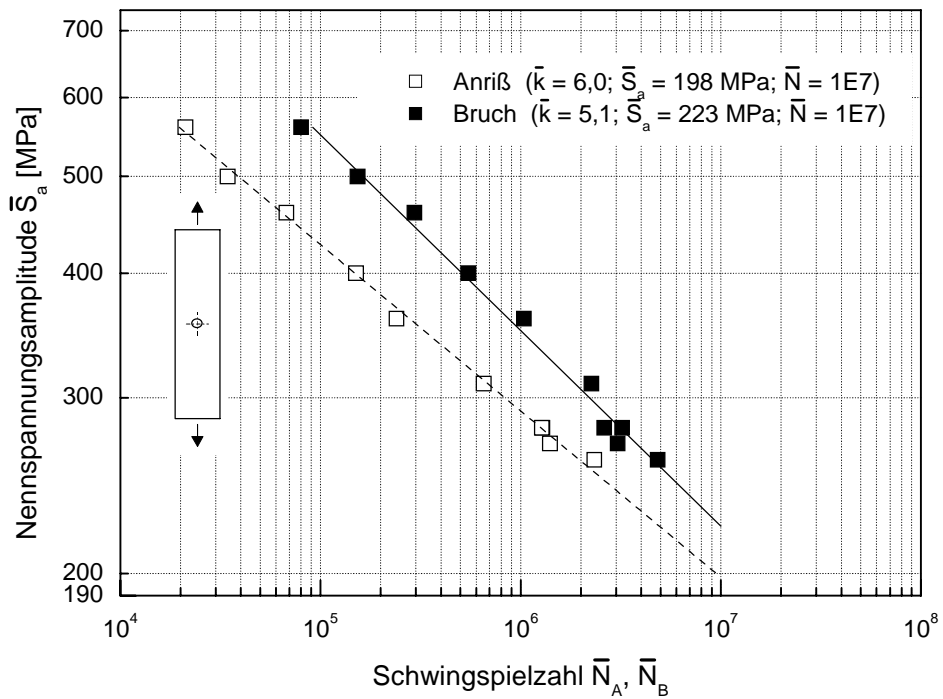


Abb. 123 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; CARLOS-V1; $\bar{R} = -1$

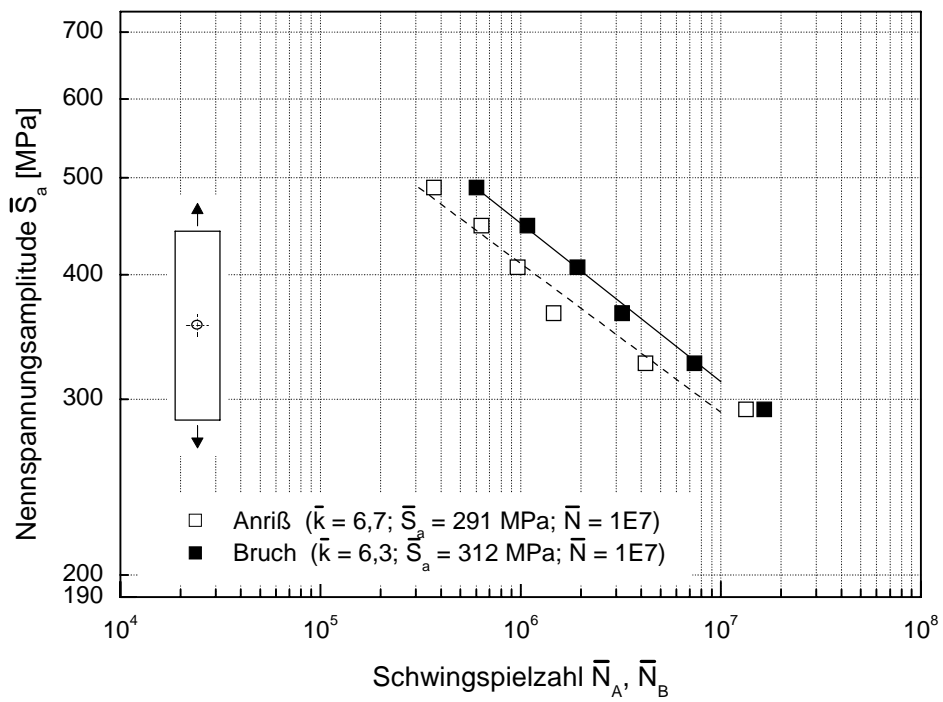


Abb. 124 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; CARLOS-V2; $\bar{R} = -0,63$

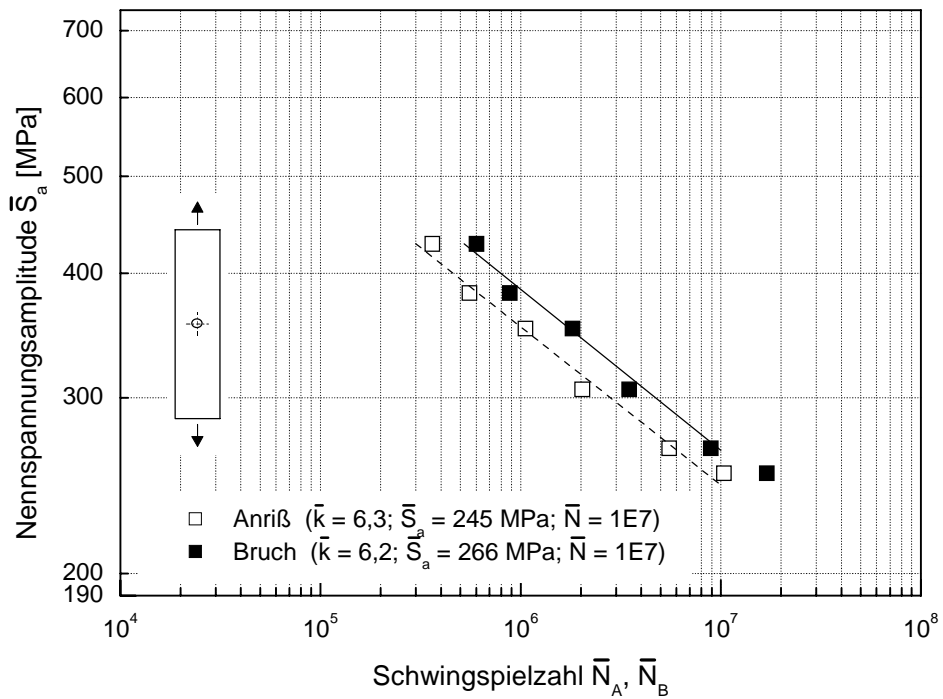


Abb. 125 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; CARLOS-V3; $\bar{R} = -0,53$

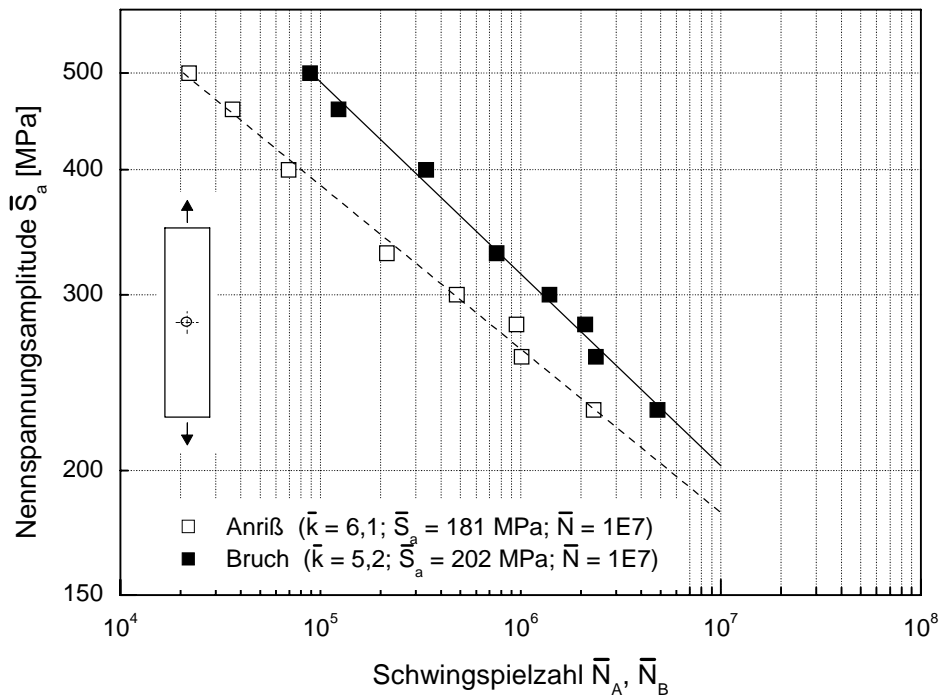


Abb. 126 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; Lastfolge LF1-1; $\bar{R} = -1$

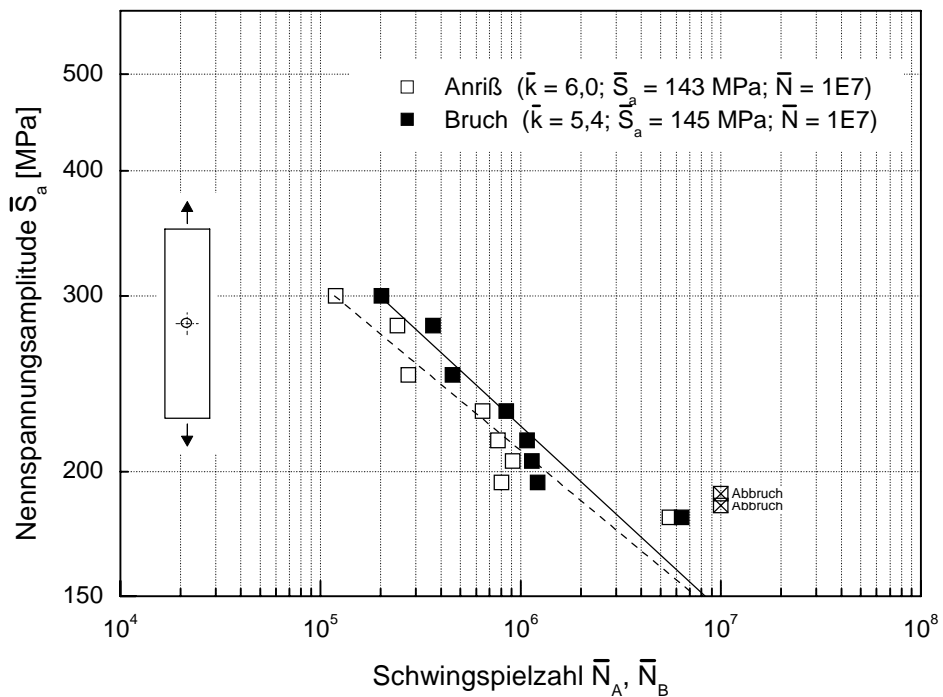


Abb. 127 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; Lastfolge LF1-0; $\bar{R} = 0$

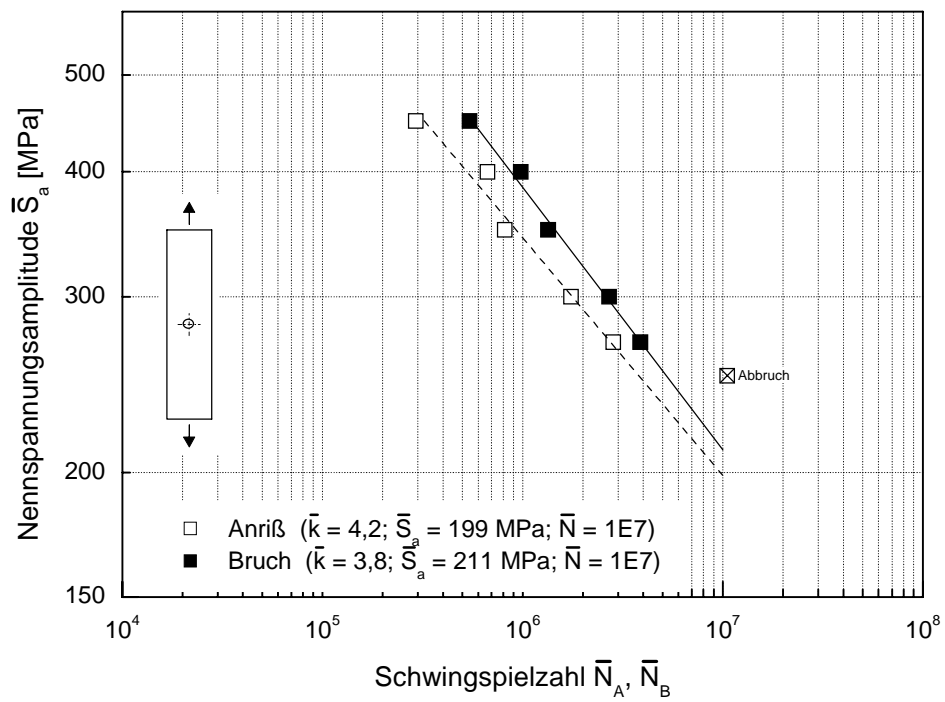


Abb. 128 Lebensdauerlinie Metasafe 900; Flachprobe $K_t = 3,6$; Zug-Druck; Lastfolge LF3; $\bar{R} = -1$

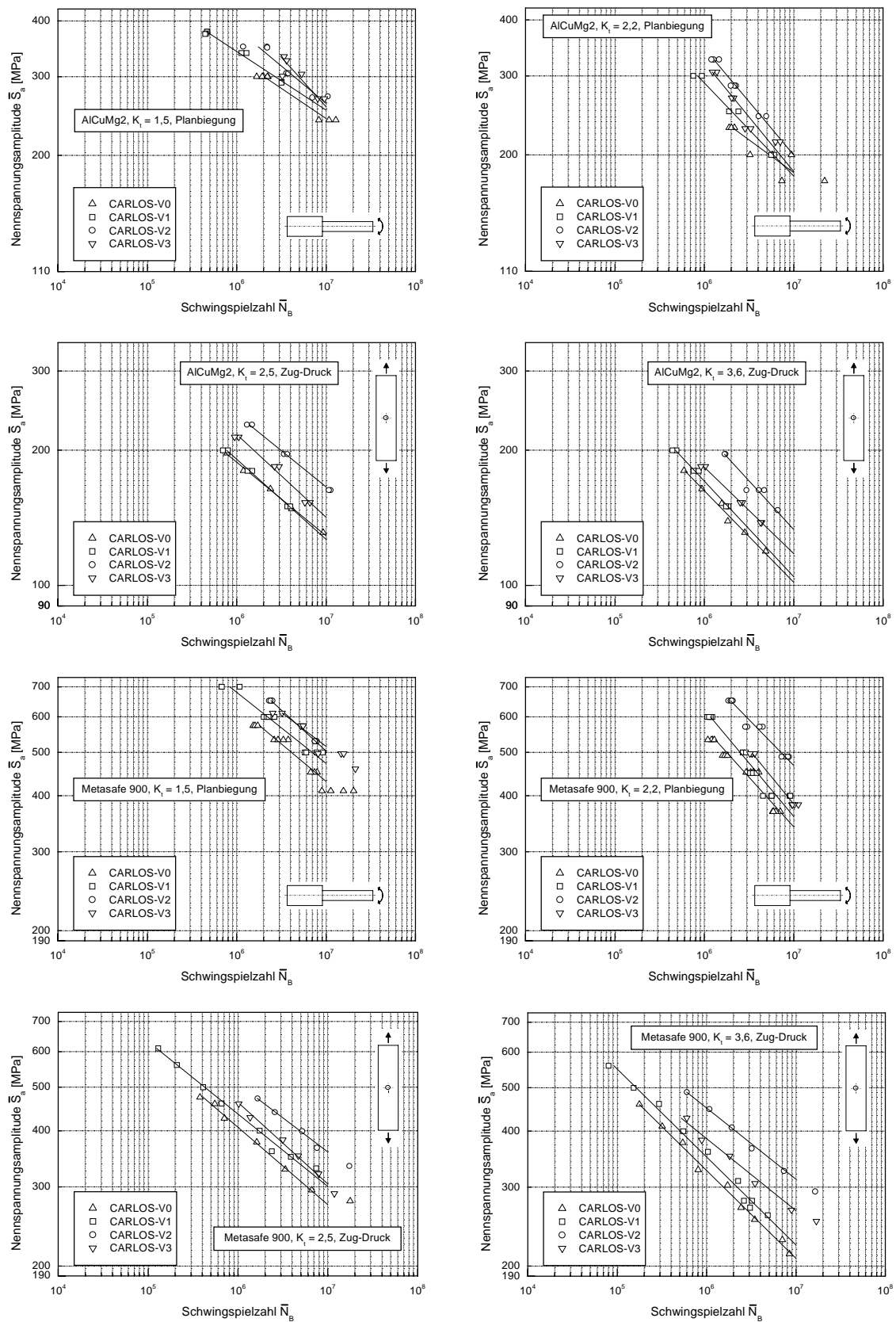


Abb. 129 CARLOS-Lebensdauerlinien je Formzahl, AlCuMg2, Metasafe 900

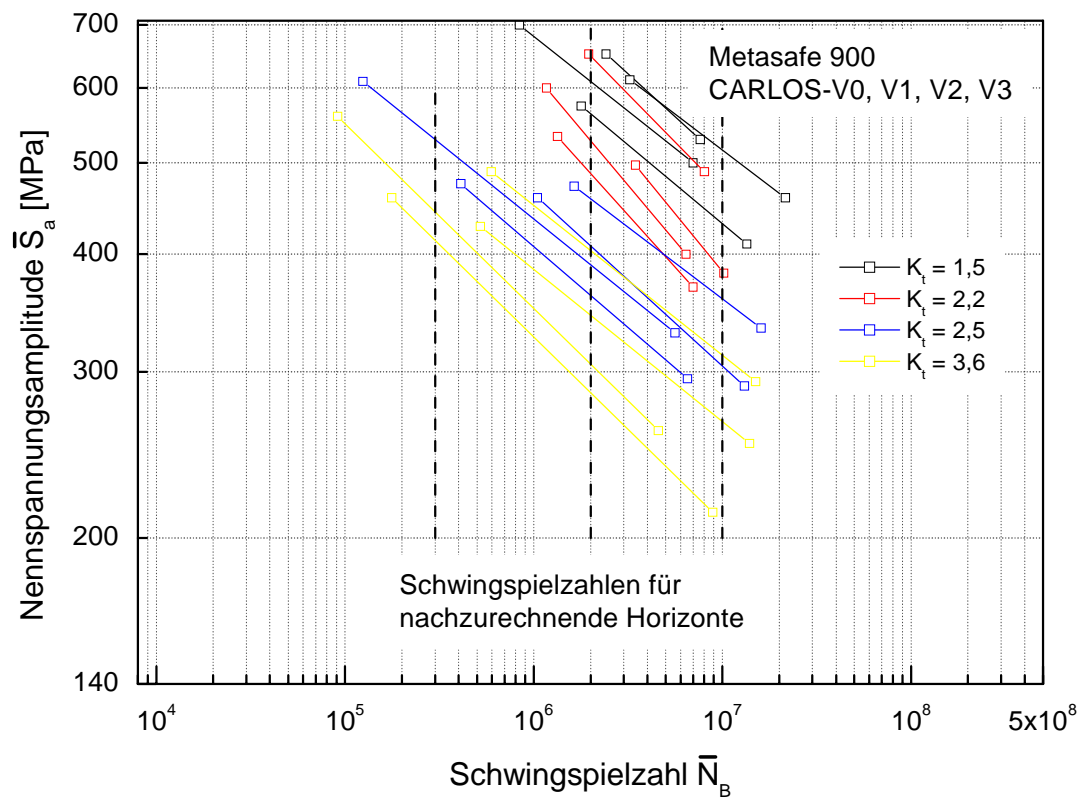
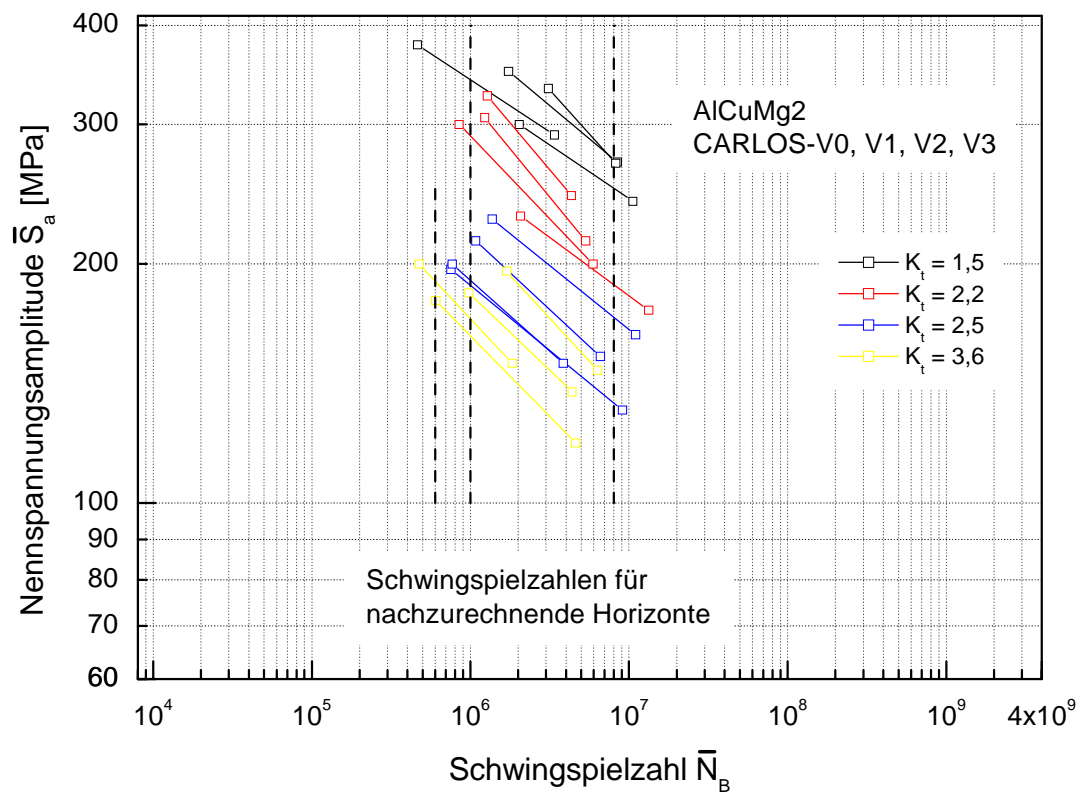


Abb. 130 CARLOS-Lebensdauerlinien aller Formzahlen, AlCuMg2, Metasafe 900

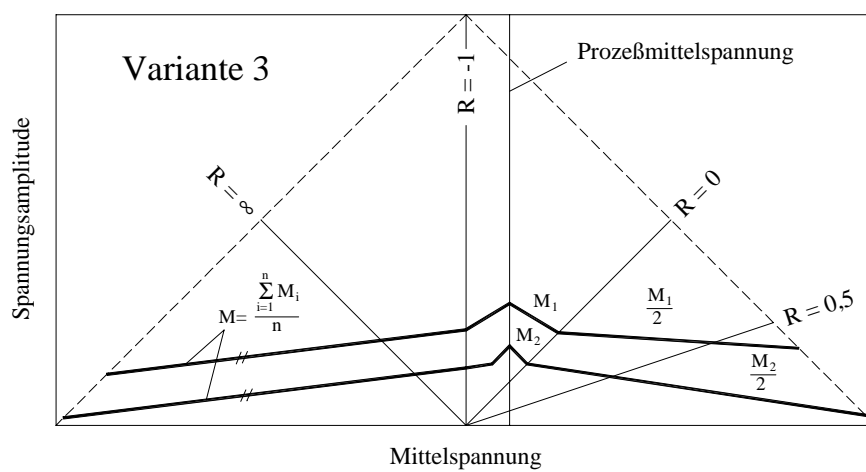
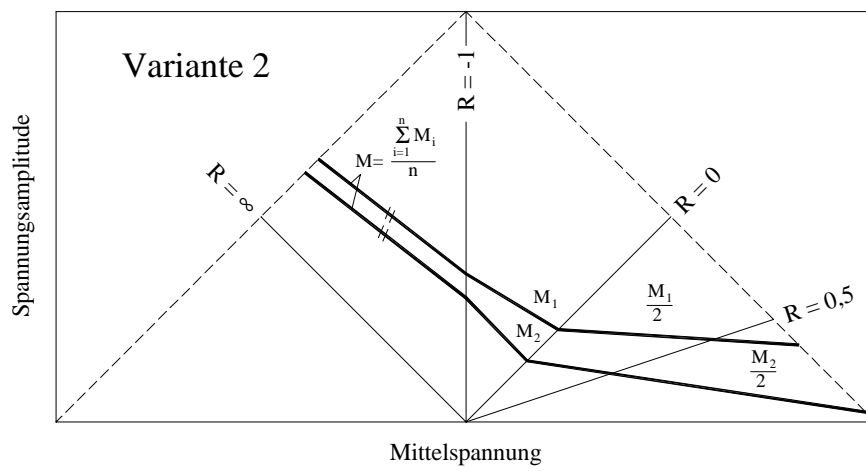
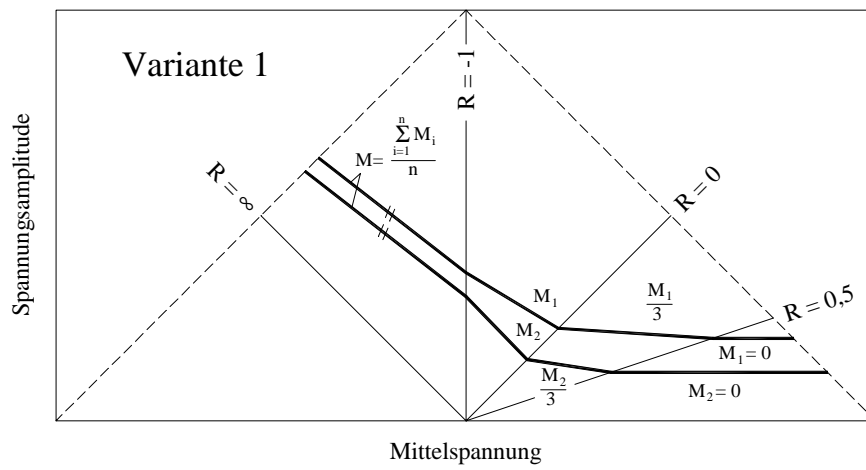


Abb. 131 Varianten des HAIGH-Schaubildes

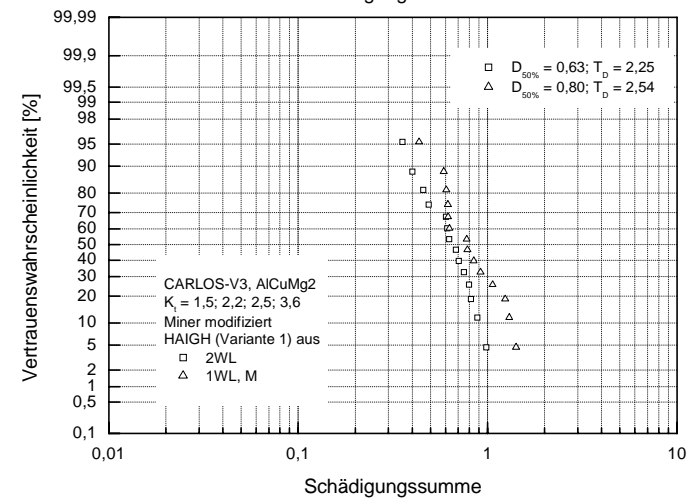
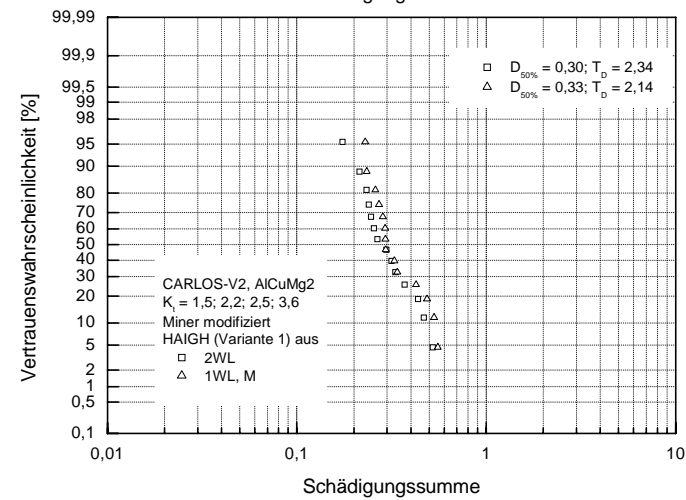
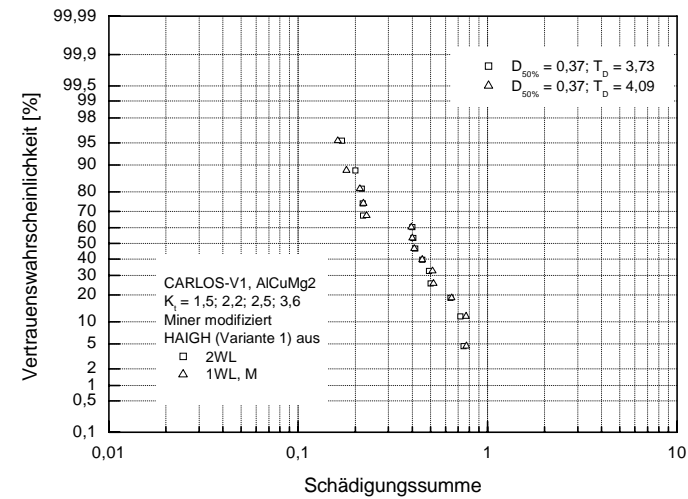
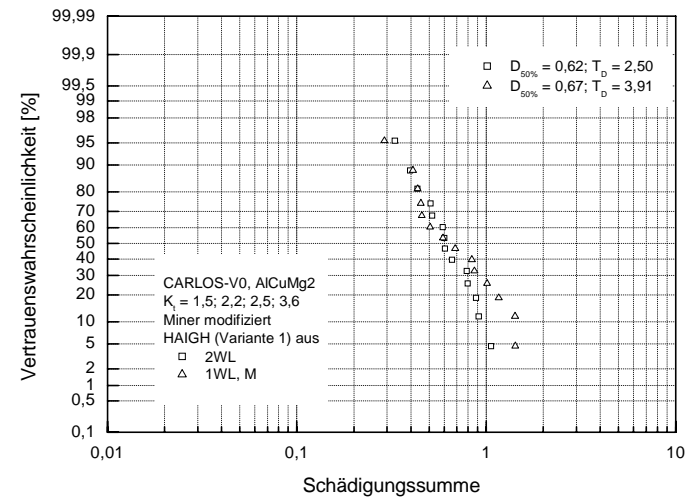


Abb. 132 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, CARLOS-Lastfolgen, AlCuMg2

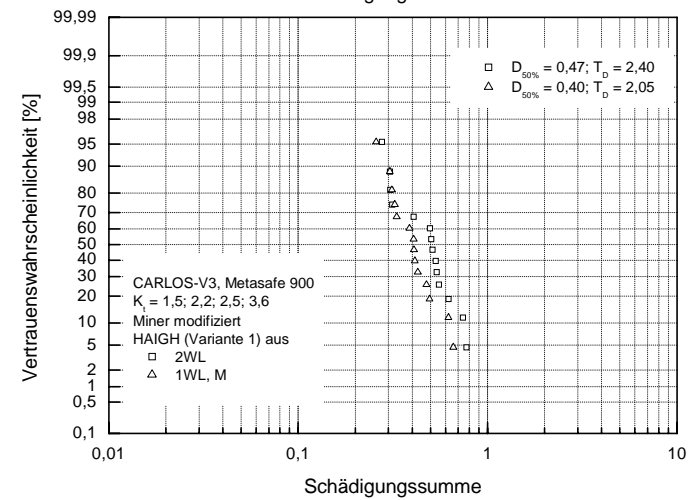
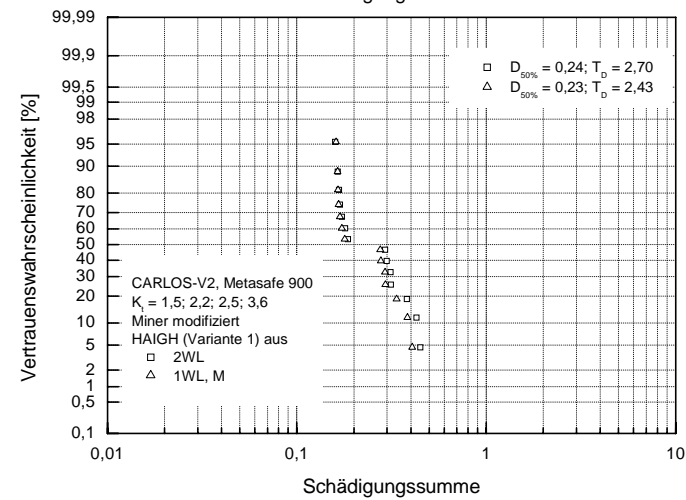
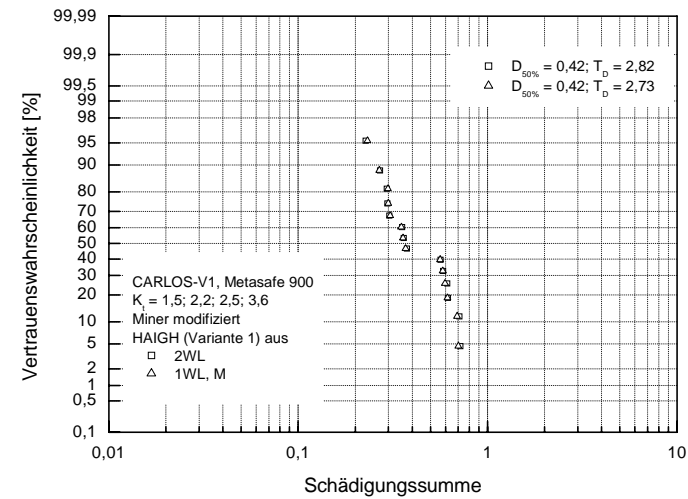
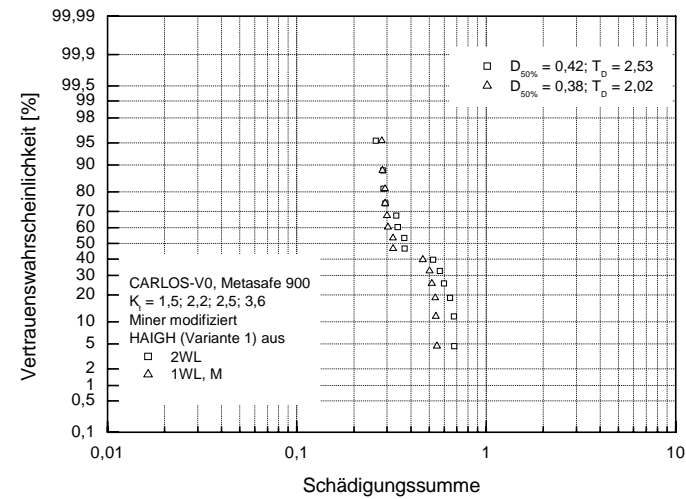


Abb. 133 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, CARLOS- Lastfolgen, Metasafe 900

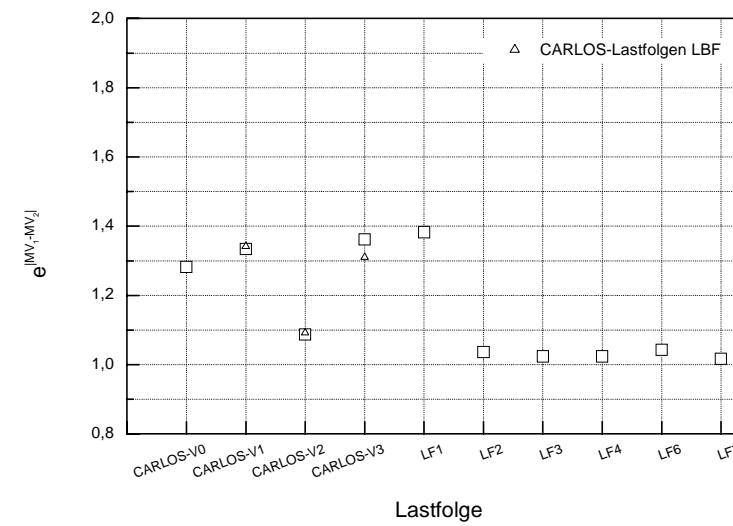
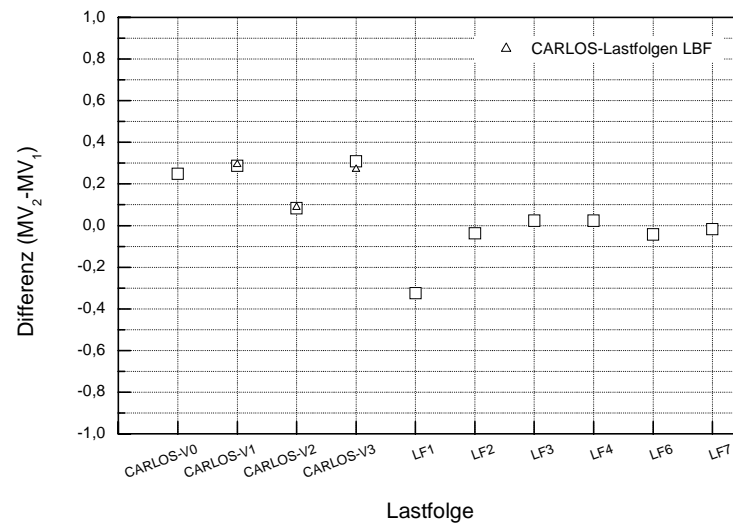
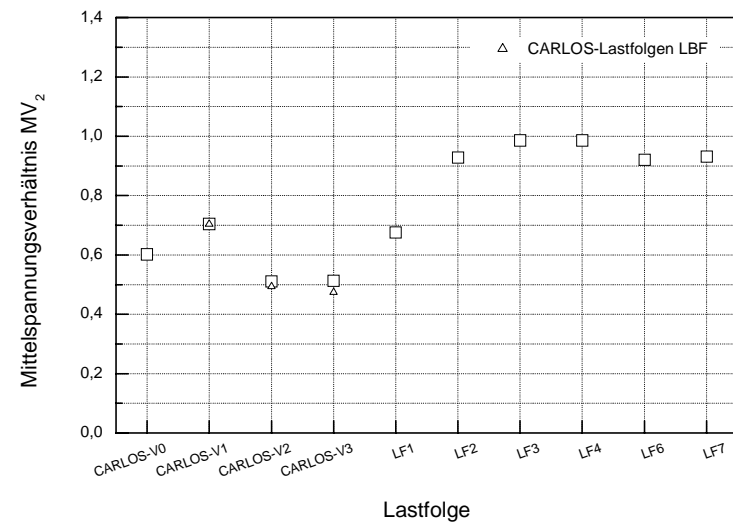
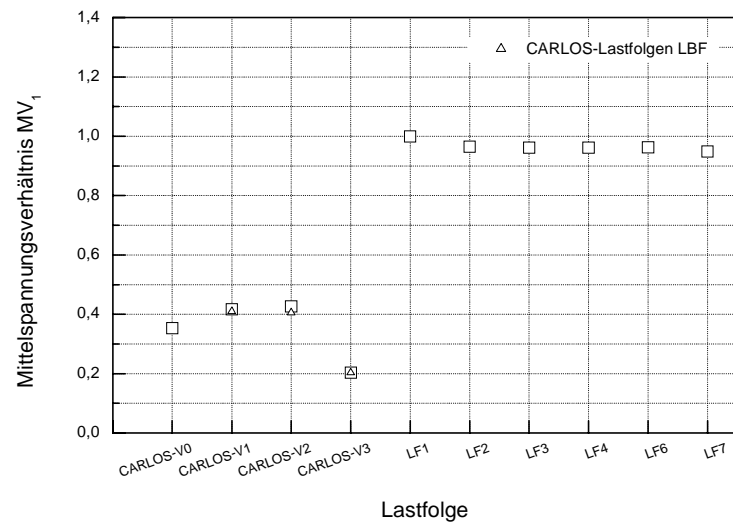


Abb. 134 Mittelspannungsverhältnisse MV_1 , MV_2 und Kennwert $e^{|MV_1 - MV_2|}$

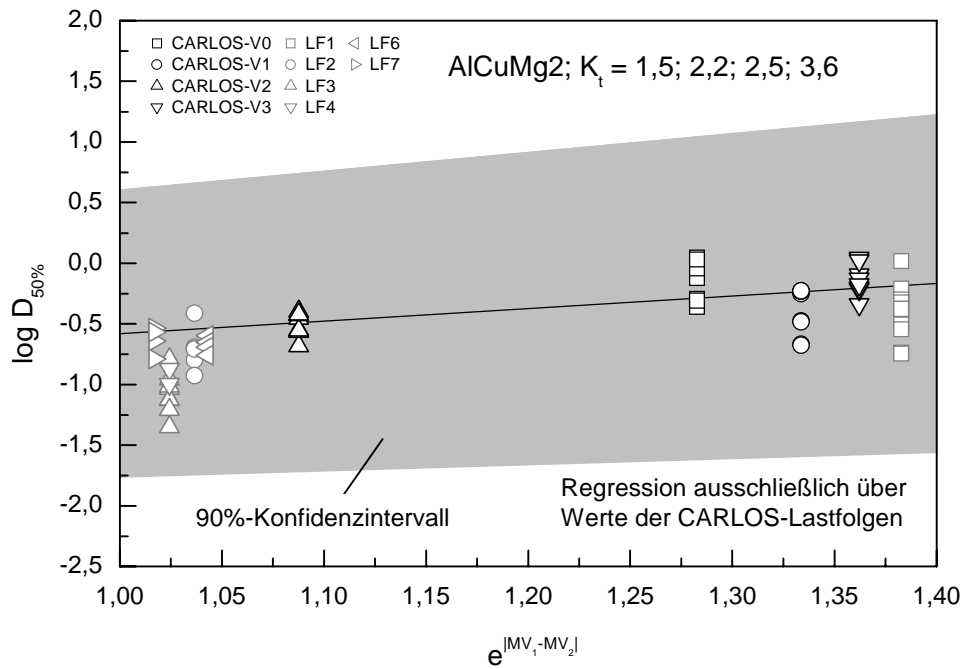


Abb. 135 $\log D_{50\%}$ vs. lastfolgeabhängiger Kennwert $e^{|MV_1 - MV_2|}$ für AlCuMg2

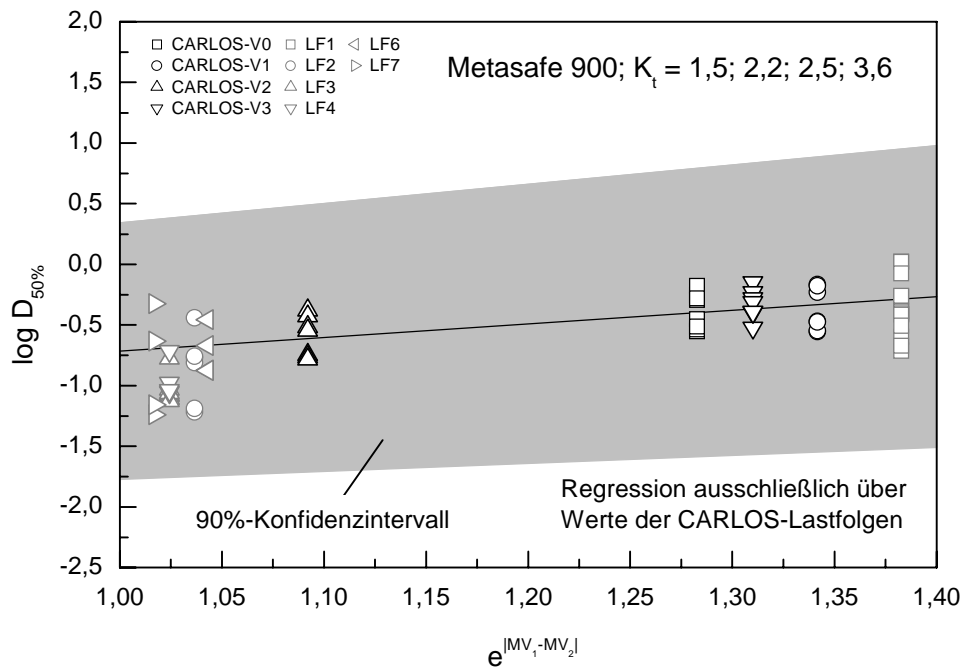


Abb. 136 $\log D_{50\%}$ vs. lastfolgeabhängiger Kennwert $e^{|MV_1 - MV_2|}$ für Metasafe 900

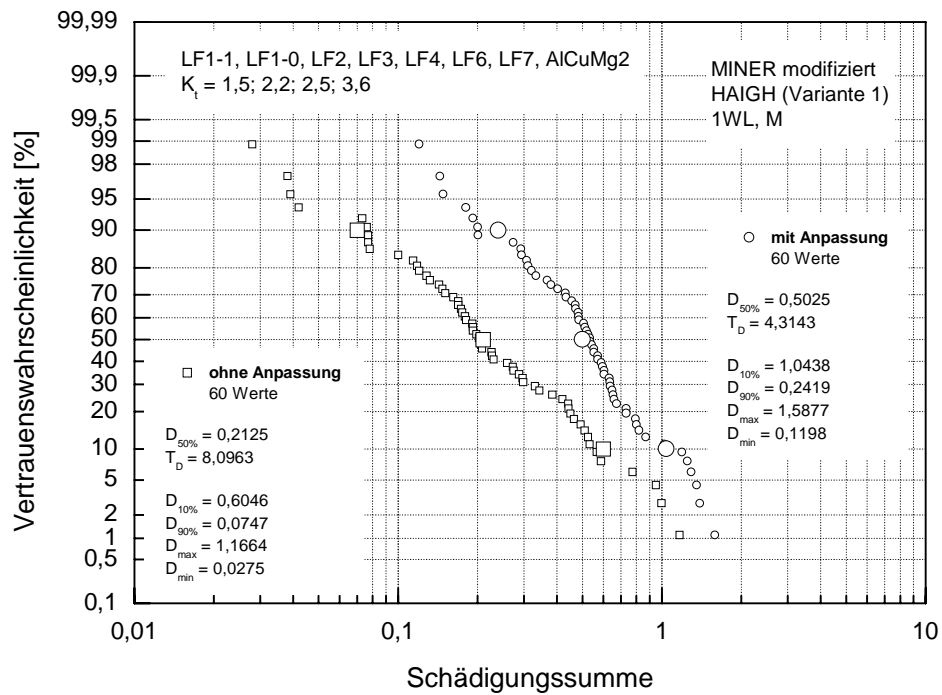


Abb. 137 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, LF1 bis LF7, AlCuMg2, ohne und mit Anpassung

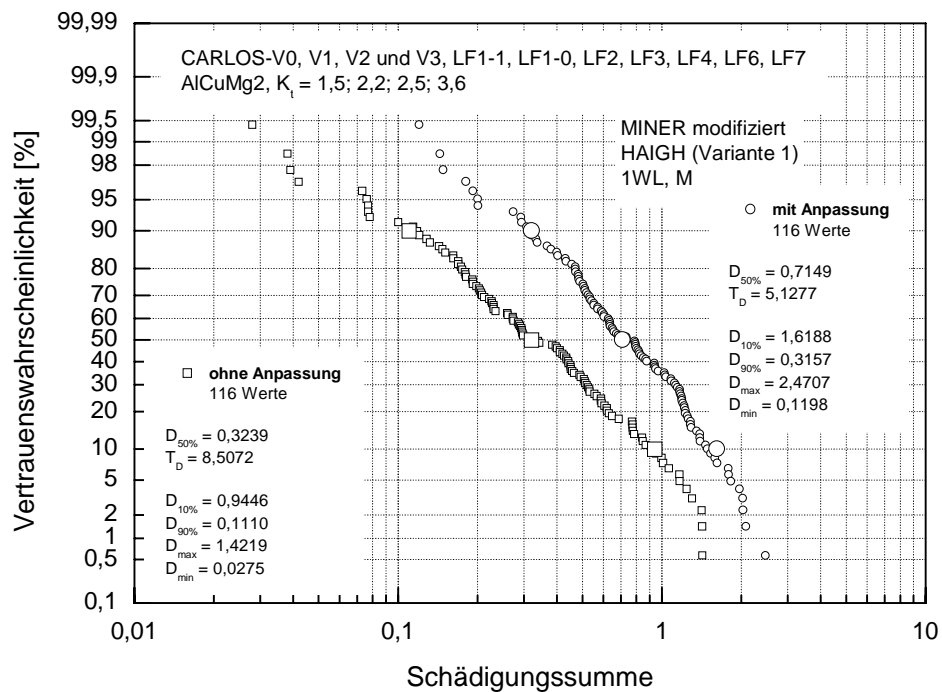


Abb. 138 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, AlCuMg2, ohne und mit Anpassung

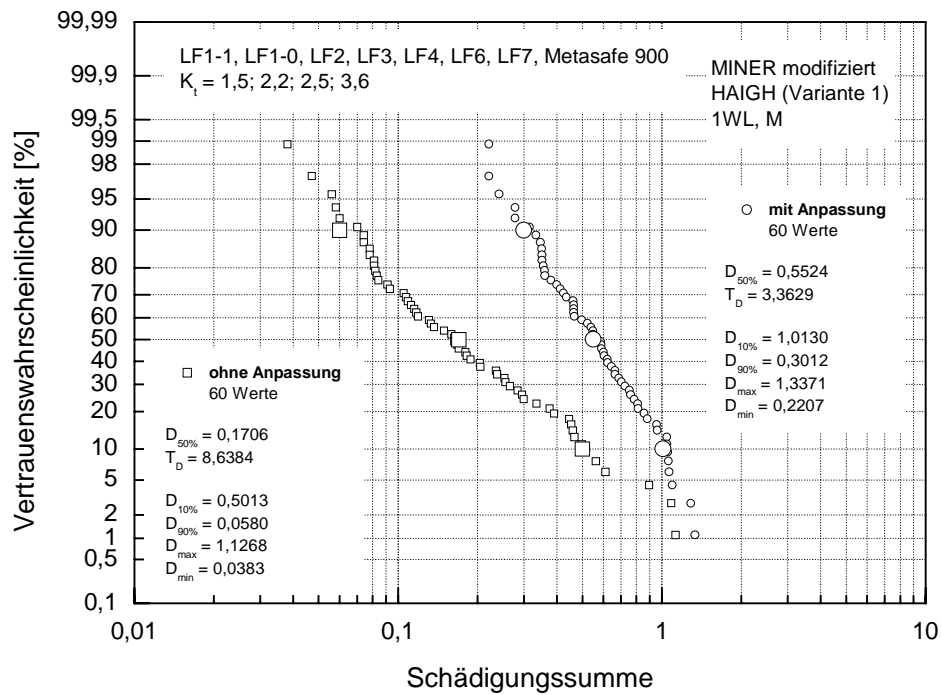


Abb. 139 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, LF1 bis LF7, Metasafe 900, ohne und mit Anpassung

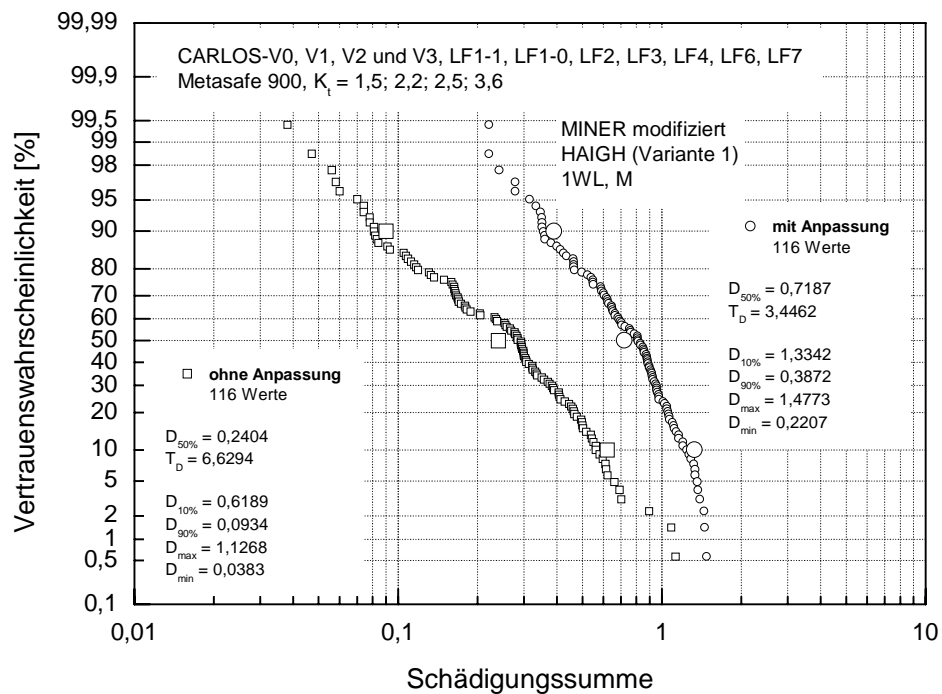


Abb. 140 Verteilung der Schädigungssummen, Nennspannungskonzept, Bruch, CARLOS-Lastfolgen und LF1 bis LF7, Metasafe 900, ohne und mit Anpassung

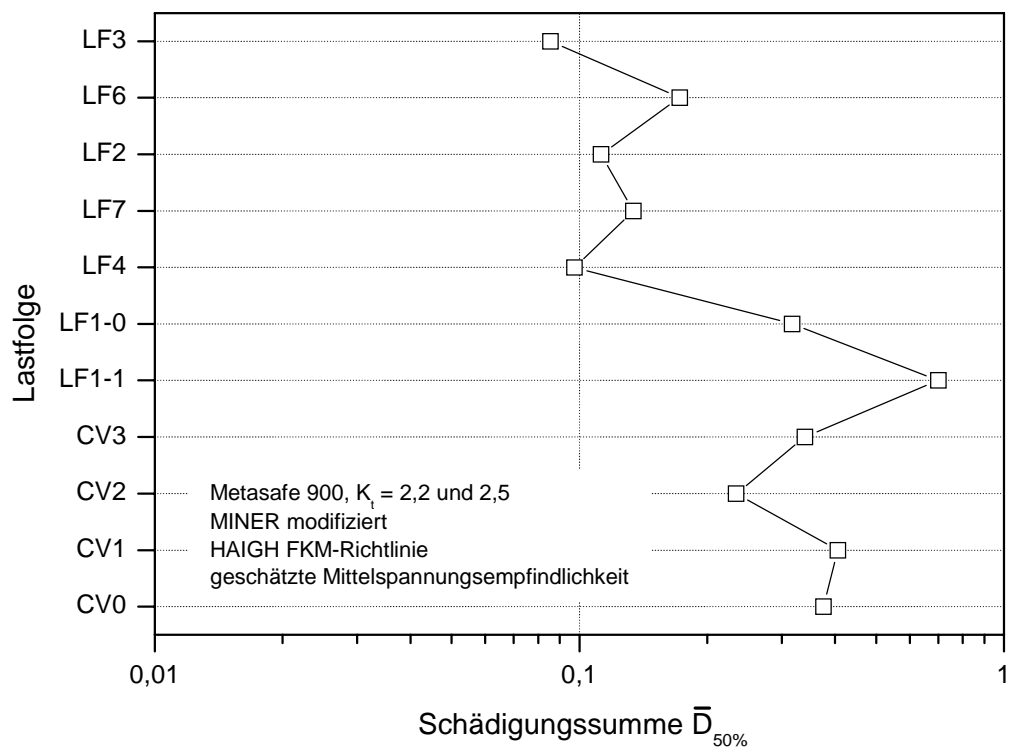
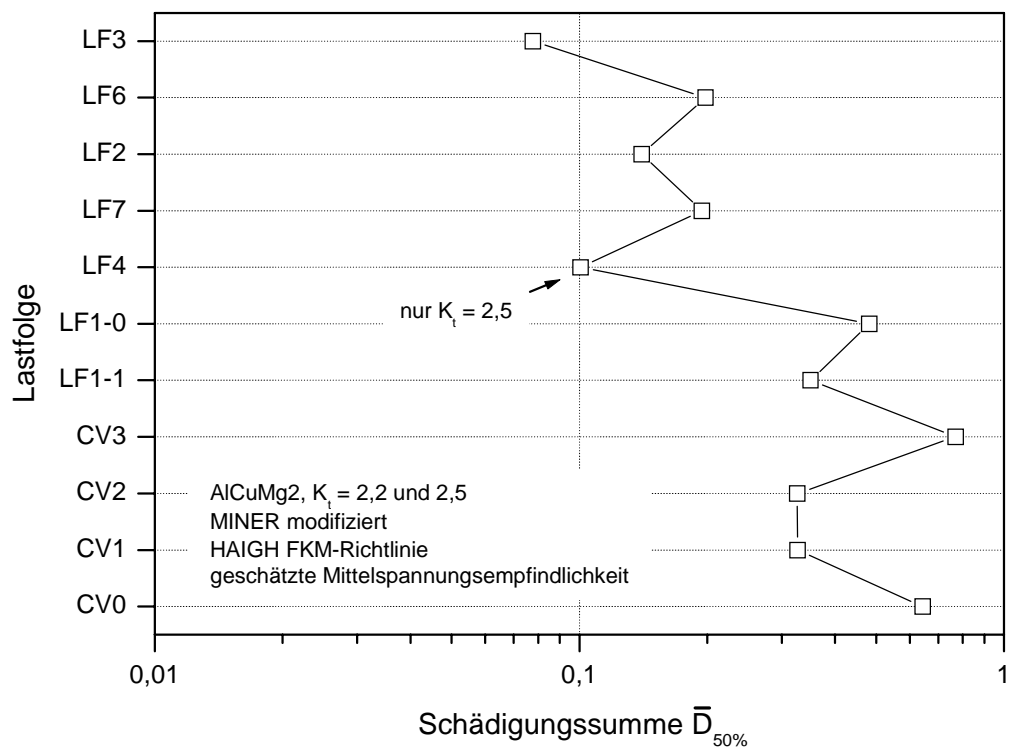


Abb. 141 lastfolgetypische Schädigungssummen - AlCuMg2 und Metasafe 900

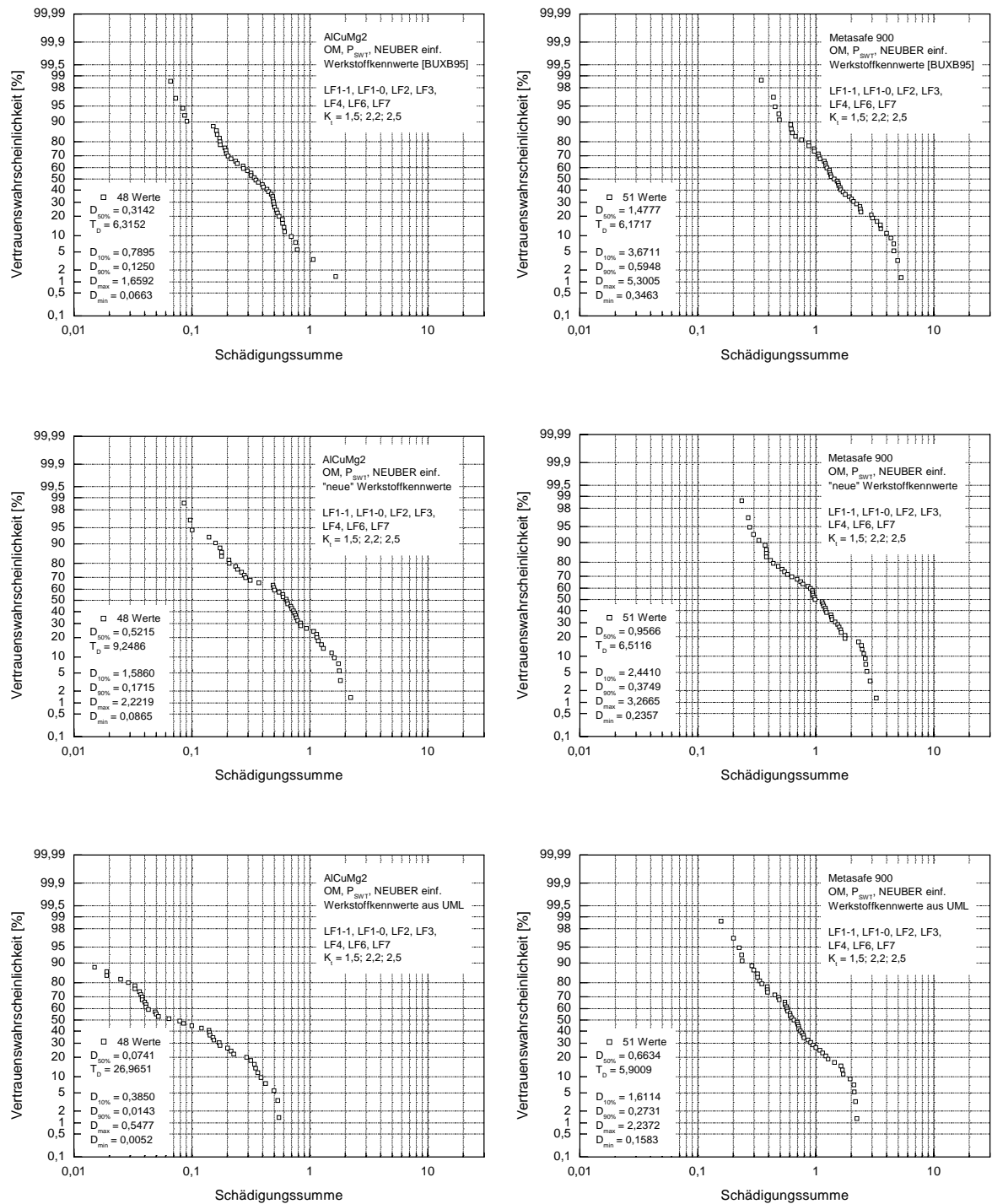


Abb. 142 Verteilung der Schädigungssummen - Einfluß der Werkstoffkennwerte, Örtliches Konzept, LF1 bis LF7, AlCuMg2 und Metasafe 900

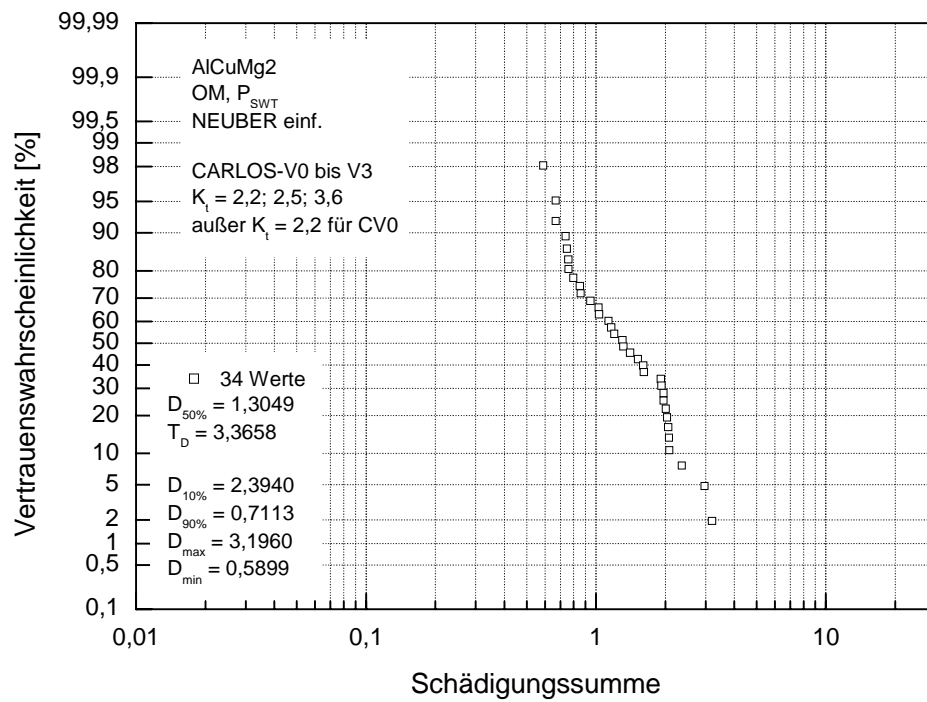
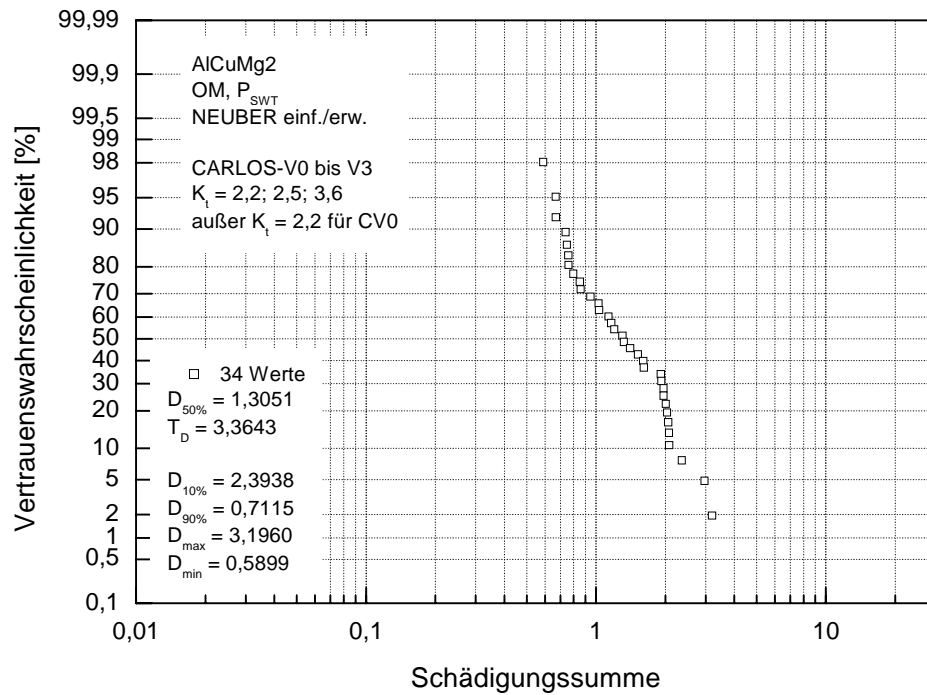


Abb. 143 Verteilung der Schädigungssummen - Einfluß der NEUBER-Regel, Örtliches Konzept, CARLOS-Lastfolgen, AlCuMg2

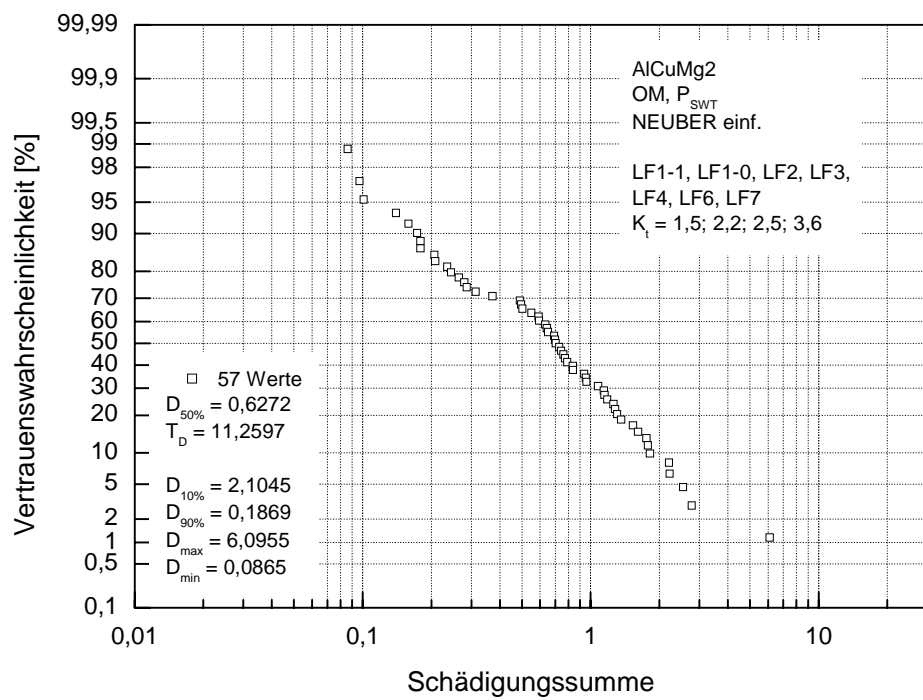
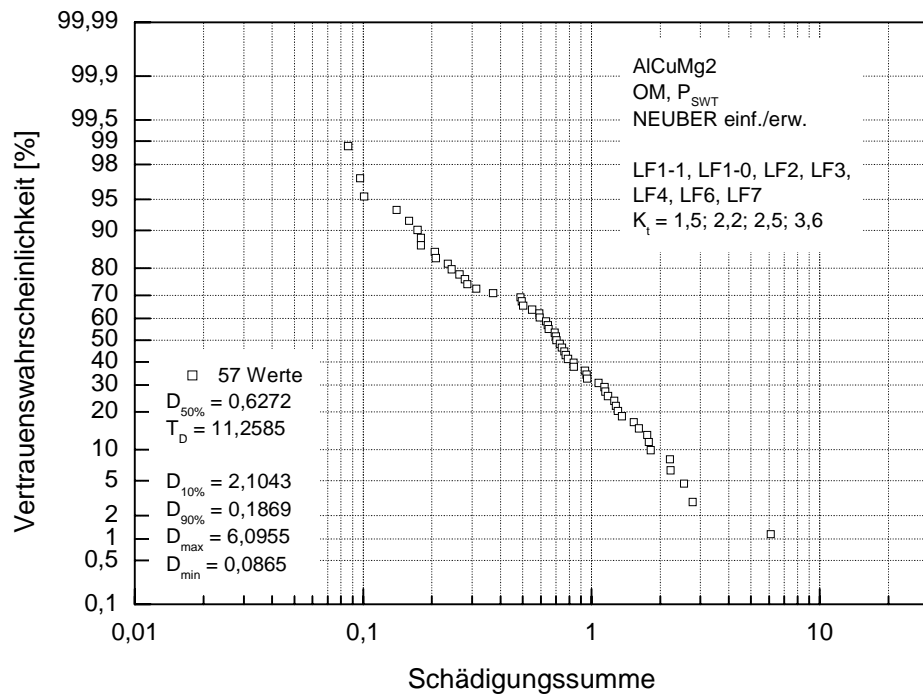


Abb. 144 Verteilung der Schädigungssummen - Einfluß der NEUBER-Regel, Örtliches Konzept, LF1 bis LF7, AlCuMg2

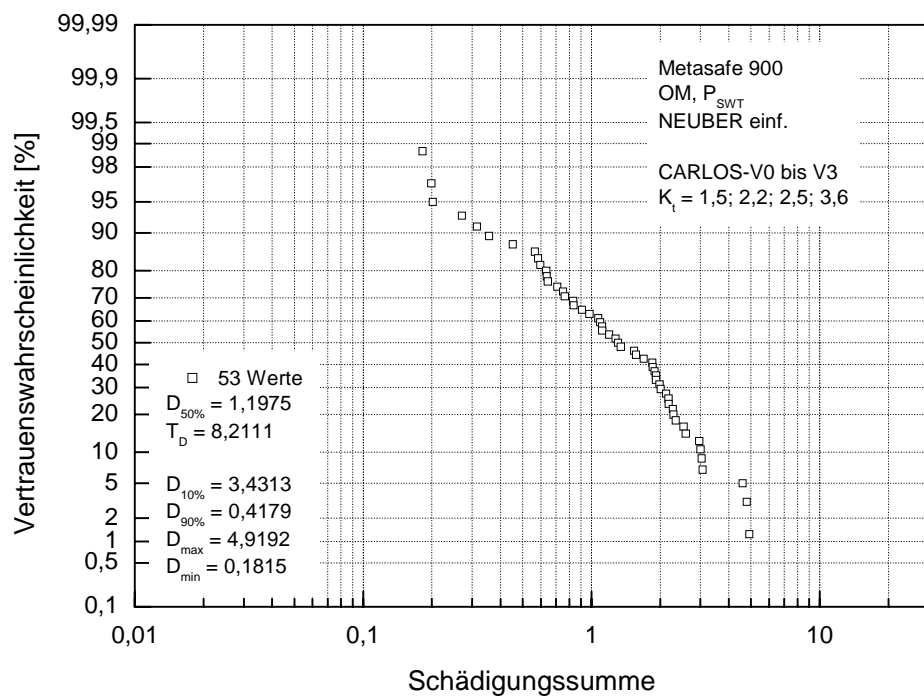
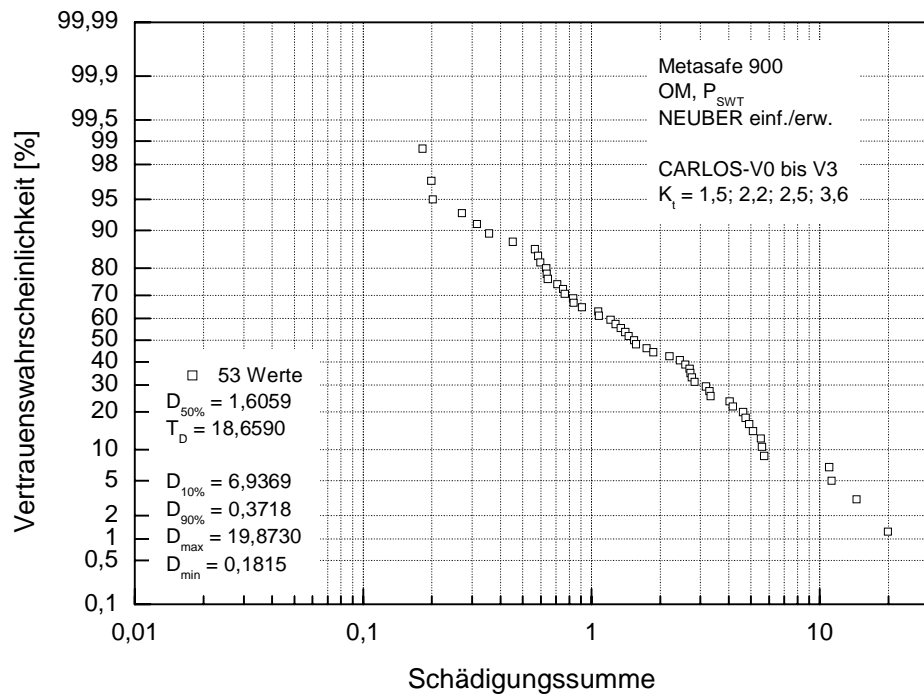


Abb. 145 Verteilung der Schädigungssummen - Einfluß der NEUBER-Regel, Örtliches Konzept, CARLOS-Lastfolgen, Metasafe 900

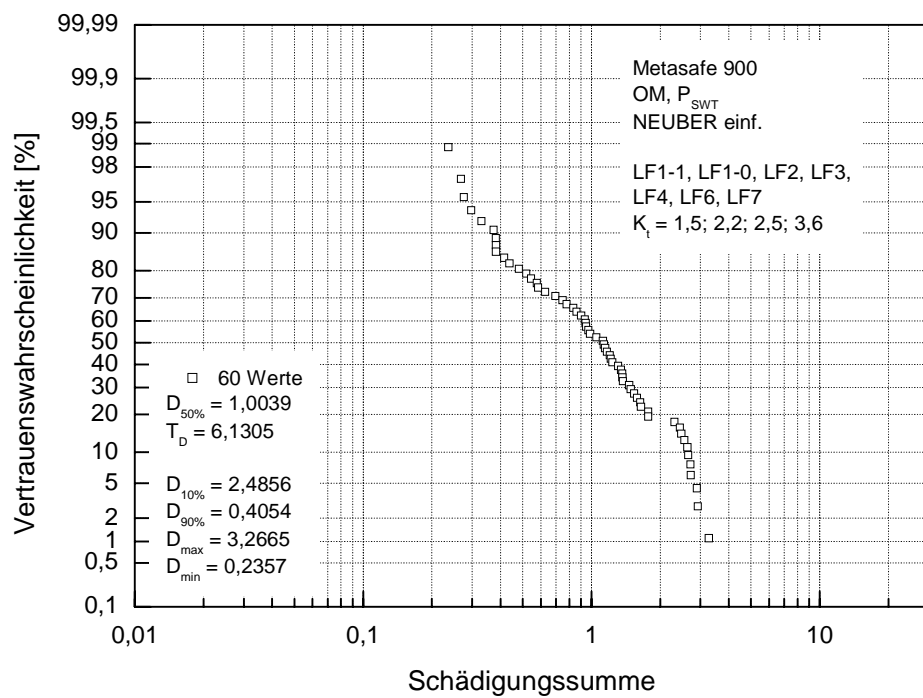
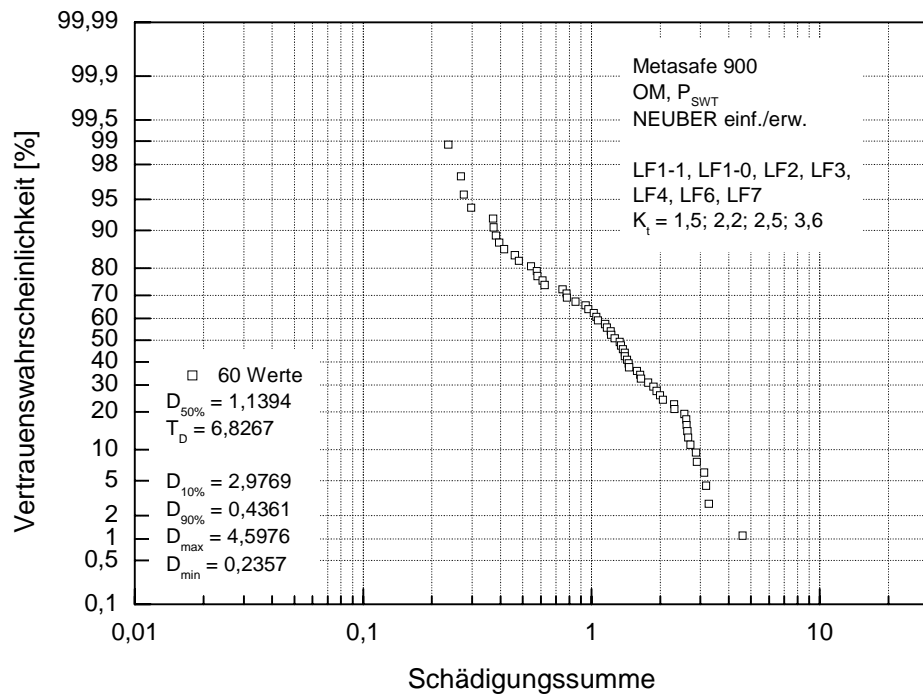


Abb. 146 Verteilung der Schädigungssummen - Einfluß der NEUBER-Regel, Örtliches Konzept, LF1 bis LF7, Metasafe 900

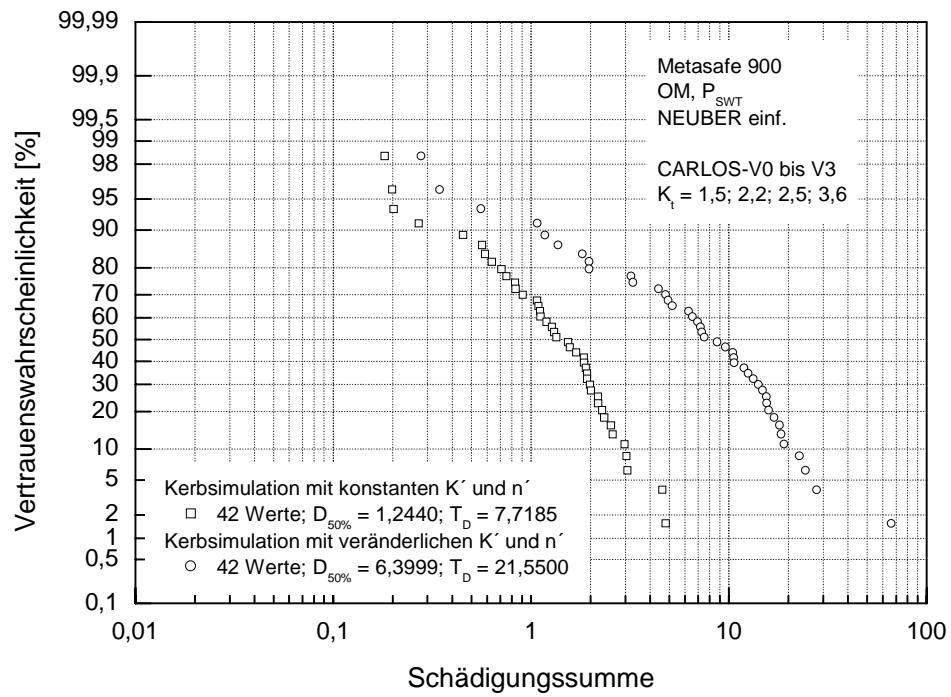


Abb. 147 Verteilung der Schädigungssummen - Kerbsimulation ohne und mit Entfestigung, Örtliches Konzept, CARLOS-Lastfolgen, Metasafe 900

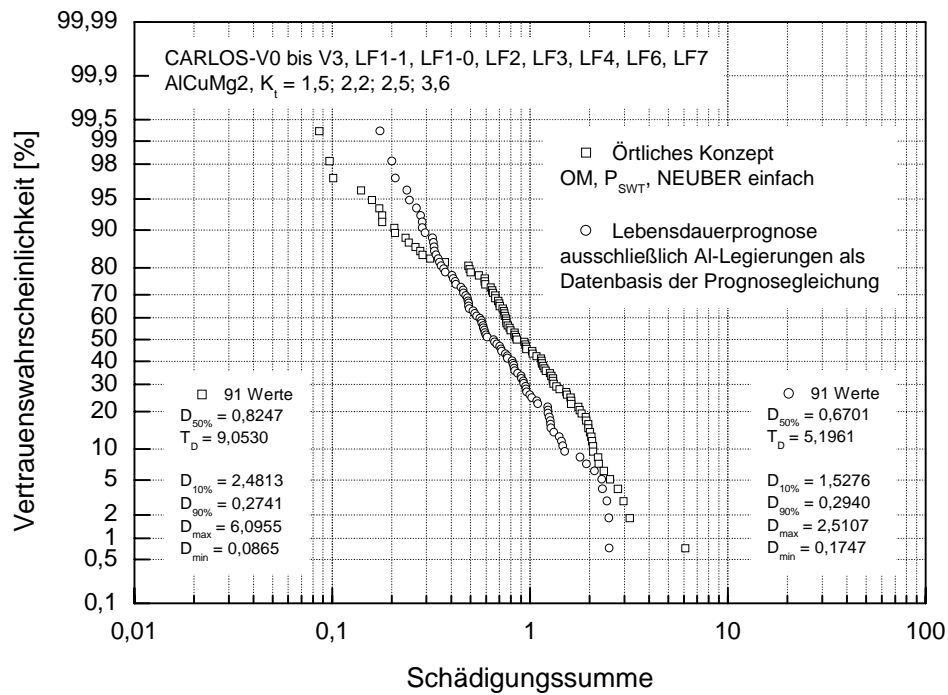


Abb. 148 Verteilung der Schädigungssummen - Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose, AlCuMg2

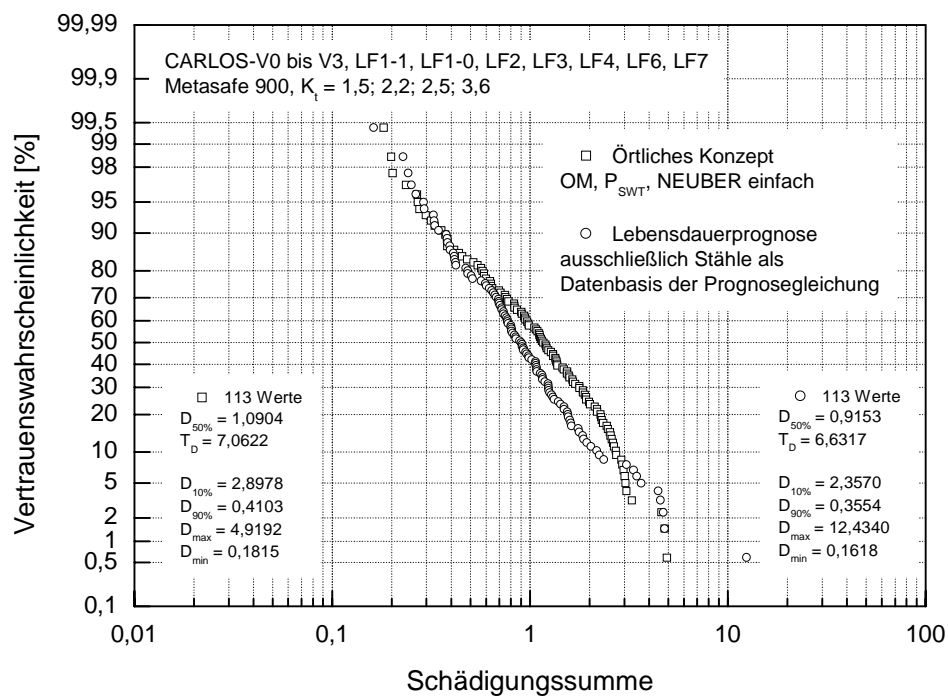


Abb. 149 Verteilung der Schädigungssummen - Örtliches Konzept und Lebensdauerprognose, Metasafe 900